

УДК 621. 313: 621.318.122

*Грицюк В.Ю.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПОЛЫМ ПЕРФОРИРОВАННЫМ РОТОРОМ

Отримано сімейства механічних характеристик ПЕМП при різних схемах перфорації порожнистого ферромагнітного ротора, а також при різних значеннях його конструктивних параметрів. Встановлено закономірність, що визначає вплив ступеня перфорації порожнистого ферромагнітного ротора на величину електромагнітного моменту.

***Ключові слова:** поліфункціональний електромеханічний перетворювач, перфорований ротор, механічні характеристики, метод скінченних елементів.*

Получены семейства механических характеристик ПЭМП при различных схемах перфорации полого ферромагнитного ротора, а также при различных значениях его конструктивных параметров. Установлена закономерность, определяющая влияние степени перфорации полого ферромагнитного ротора на величину электромагнитного момента.

***Ключевые слова:** полифункциональный электромеханический преобразователь, перфорированный ротор, механические характеристики, метод конечных элементов.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Полифункциональные электромеханические преобразователи с полым перфорированным ротором (ПЭМП с ППР) относятся к новому классу электромеханических устройств и представляют собой совмещенную техническую систему с полифункциональными свойствами, объединяющую в себе электромеханическую, механическую, тепловую и гидравлическую системы.

Одной из главных задач проектирования ПЭМП с ППР является получение наибольшего электромагнитного момента с целью обеспечения максимального напора (расхода) жидкости. Поэтому, важно установить зависимости, непосредственно связывающие параметры механической характеристики с конструктивными параметрами ППР. Дискретное расположение отверстий ротора приводит к возникновению неравномер-

ностей магнитного поля в воздушном зазоре, как в осевом, так и в тангенциальном направлениях, а также к перераспределению вихревых токов в массивном роторе, что в свою очередь оказывает влияние на выходные характеристики ПЭМП. Необходимо отметить, что в отечественной и зарубежной технической литературе отсутствуют работы, в которых бы рассматривалось влияние перфораций ферромагнитного ротора на выходные характеристики электромеханического преобразователя.

Постановка задачи. Задачей данной работы является экспериментальное определение влияния конструктивных параметров ППР на механическую (статическую) характеристику ПЭМП, а также установление зависимостей, непосредственно связывающих параметры механической характеристики с конструктивными параметрами ППР.

Изложение материала и его результаты. С целью определения влияния перфораций ротора на величину электромагнитного момента была проведена серия конечно-элементных расчетов механических характеристик ПЭМП с различными конструктивными вариантами ППР.

Среди отечественных и зарубежных публикаций последнего времени встречаются работы [1,2,3,4], посвященные определению электромагнитного момента по результатам решения полевых задач методом тензора магнитного натяжения, подтверждающие эффективность данного метода. При численных расчетах целесообразно использовать этот метод, так как он является наименее трудоемким и реализуется продолжением вычислений в рамках метода конечных элементов. В данной работе расчет механических характеристик ПЭМП с ППР выполнен с помощью метода тензора магнитного натяжения, реализованного на базе трехмерной математической модели [5], поэтому, выбор оптимальных параметров сетки конечных элементов (СКЭ) проводился с учетом требований данного метода.

Как показывает опыт расчетов [6], приемлемая точность определения момента по максвелловским натяжениям обеспечивается, если на участке плоской модели, соответствующем воздушному зазору, имеется два-три слоя треугольных конечных элементов (КЭ). Одновременно, требования по степени дискретизации предъявляются к проводящим элементам конструкции, в которых рассчитываются вихревые токи. В литературе [7] указывается на то, что шаг сетки в них должен быть не более $1/4$ глубины проникновения поля. В работе [8] предложена модификация метода магнитных натяжений, названная методом «eggshell», идея которого состоит в построении семейства концентрических эквивалентных поверхностей для расчета электромагнитного момента через тензор натяжений с последующим его усреднением. Достоинством этого метода является его точность при «нечувствительности» к степени дискретизации области воздушного зазора электрической машины. Подоб-

ным образом в работе [6] массивный ротор представляется как многослойная структура, в которой каждый слой обладает постоянной магнитной проницаемостью. При этом точность метода натяжений снижается незначительно, однако существенно сокращается объем вычислений.

Перечисленные методы и рекомендации к выбору оптимальных параметров СКЭ подсказывают возможность использования подобного подхода при решении трехмерных полевых задач. Выполнение областей воздушного зазора и полого ротора в виде многослойных, состоящих из нескольких эквивалентных с точки зрения магнитных и электрических свойств коаксиальных цилиндров, позволяет получить СКЭ с необходимой степенью дробности и провести корректное сопоставление полученных результатов. Все цилиндры сохраняют связь в узлах СКЭ, поэтому введение особых граничных условий не требуется.

Сложность моделирования ПЭМП с ППР заключается в том, что с ростом количества перфораций в роторе, количество КЭ необходимых для описания криволинейных границ трехмерной геометрии модели существенно возрастает, что приводит к чрезвычайно большим объемам вычислений. Что бы получить необходимое количество слоев КЭ при автоматическом или выборочном построении сетки требуется существенное повышение уровня дискретизации конкретных участков трехмерной модели, что приводит к невозможности выполнения расчета на современном ПК.

Генерация СКЭ с использованием послойной дискретизации позволяет получить необходимое количество слоев КЭ на участках трехмерной модели, соответствующих воздушному зазору и полуму ротору (рисунок 1, а), в то время как автоматическое построение СКЭ с той же степенью дискретизации («normal» или «fine») обеспечивает получение только одного слоя КЭ на участке воздушного зазора и двух слоев КЭ на участке ППР (рисунок 1, б). Кроме того, послойная дискретизация позволяет получить более мелкую СКЭ на внутренней поверхности ротора по сравнению с автоматическим разбиением при том же уровне дробности сетки.

Предложенный подход к исследованию электромагнитного поля и механических характеристик ПЭМП с ППР на основе решения уравнений поля численными методами опробован путем сопоставления расчетных и опытных данных, полученных для физической модели ПЭМП с ППР.

Механические характеристики ПЭМП с полым ферромагнитным ротором получены по результатам параметрических расчетов модели. Переменным параметром является угловая частота вращения ротора, выраженная через частоту токов в пазах статора. Значения электромагнитного момента для различных значений скольжения получены из ре-

шения уравнений квазистационарного электромагнитного поля при соответствующих значениях токовой нагрузки. Таким образом, каждая точка механической характеристики рассчитывалась как отдельный установившийся режим.

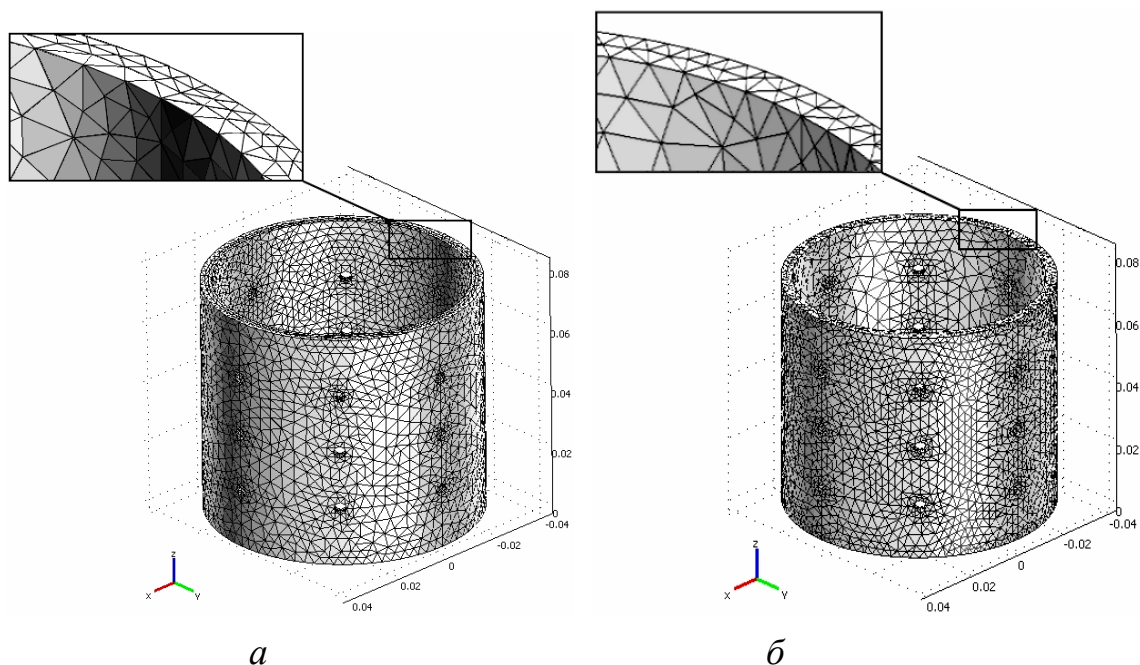


Рисунок 1 – Трехмерная СКЭ ротора
а – полученная с использованием послойной дискретизации;
б – полученная при автоматическом построении.

Для предварительного расчета токовой нагрузки использовались экспериментальные данные о токах статора при соответствующих скольжениях. Необходимость предварительного измерения токов статора физической модели при каждом значении скольжения увеличивает трудоемкость данного способа определения механических характеристик ПЭМП с ППР. Постановка трехмерной электромагнитной задачи с использованием в качестве исходных данных напряжения питания устраняет эту необходимость, однако приводит к трудно разрешимым проблемам трехмерного моделирования.

Исходным условием для расчета механических характеристик ПЭМП с различными конструктивными вариантами ППР является идентичность статоров и параметров обмоток. В качестве базового использовался статор серийного асинхронного двигателя АОЛ-21-2.

Механическая характеристика ПЭМП с полым ферромагнитным ротором без отверстий полученная по результатам численного расчета представлена на рисунке 2.

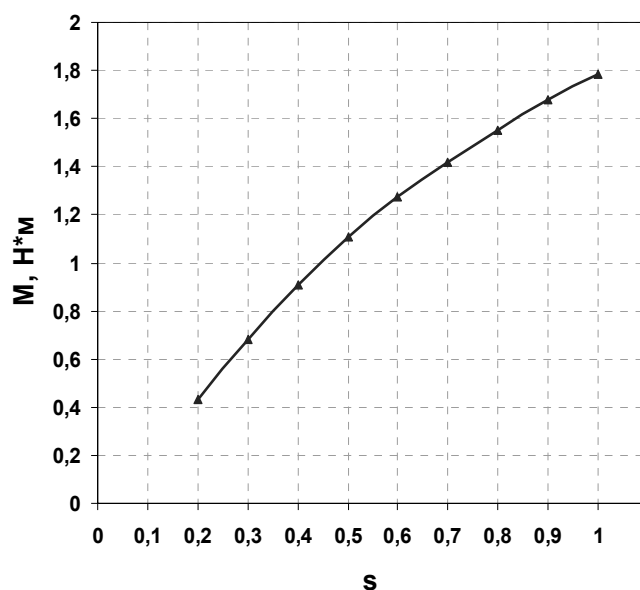


Рисунок 2 – Механическая характеристика ПЭМП с полым ферромагнитным ротором без отверстий

Учитывая большое количество и разнообразие всевозможных конструктивных вариантов ППР, ограничимся анализом только отдельных механических характеристик, которые позволяют оценить степень влияния конструктивных параметров ППР на величину вращающего момента, а также характеристик, представляющих практический интерес. В дальнейшем для удобства используются краткие обозначения конструктивных вариантов ППР. Например, обозначению П-20-3-4, соответствует ротор, имеющий 20 прямых рядов по 3 отверстия диаметром 4 мм. В принятом обозначении первая буква определяет тип схемы перфораций (П – прямые ряды; С – скошенные ряды; Ш – шахматное расположение отверстий), вторая, третья и четвертая цифры определяют параметры Z_2 (число рядов отверстий), n (число отверстий в ряду), d (диаметр отверстий) соответственно. Количественное сравнение механических характеристик проведено с использованием системы относительных единиц, в которой за базовые приняты значения номинального и пускового моментов соответствующие ПЭМП с полым ротором без отверстий.

На рисунке 3 представлено семейство механических характеристик ПЭМП с ППР при различном количестве рядов отверстий. Полученные зависимости момента от скольжения для ПЭМП с ППР при различных значениях Z_2 имеют вид, характерный для механических характеристик АД с массивным ротором. Как видно из рисунка 3, с увеличением количества рядов отверстий (при $n = \text{const}$, $d = \text{const}$) величины моментов уменьшаются практически при всех значениях скольжения. При этом с ростом скольжения уменьшение величины момента проявляется замет-

нее. Так, для ППР имеющего 24 ряда отверстий, величина номинального момента снижается на 9 %, а пускового на 15 %. Результаты физического и численного экспериментов показали, что выбор четного количества рядов отверстий (4, 8, 16, 20, 24, 40) при малом количестве отверстий в ряду (1...4) диаметром 2...4 мм позволяет получить механическую характеристику эквивалентную механической характеристике ПЭМП с гладким ротором.

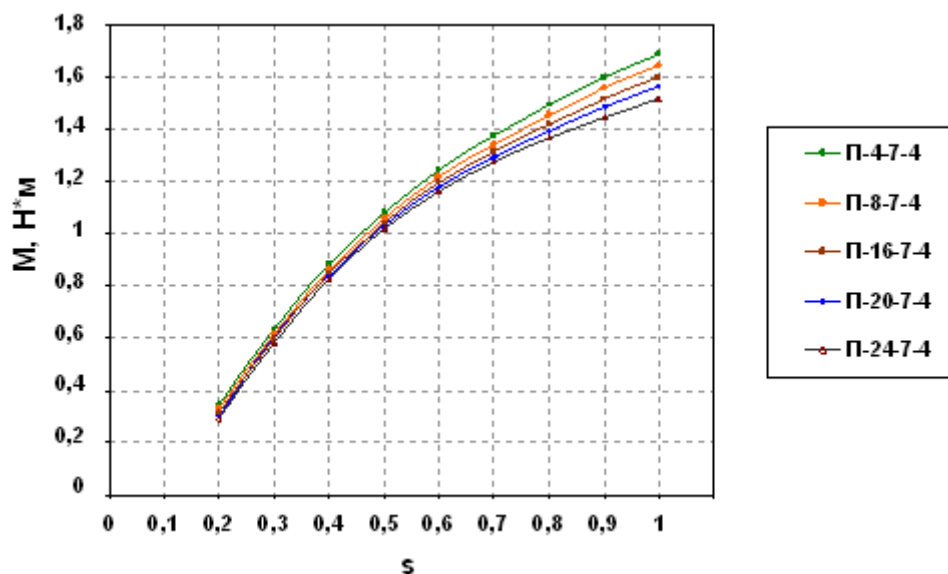


Рисунок 3 – Семейство механических характеристик ПЭМП с ППР при различных значениях Z_2 ($n = 7, d = 4$ мм)

Семейства механических характеристик ПЭМП с ППР при различном количестве отверстий в ряду n ($Z_2 = \text{const}, d = \text{const}$) и различном диаметре отверстий d ($Z_2 = \text{const}, n = \text{const}$) представлены соответственно на рисунке 4 и рисунке 5.

Из представленных семейств характеристик следует, что увеличение количества отверстий в ряду и диаметра, также приводит к снижению момента. При этом, увеличение числа n на единицу оказывает на механическую характеристику приблизительно такое же влияние, как и увеличение d на 1 мм. Одновременное увеличение диаметра отверстий приводит к более резкому снижению момента.

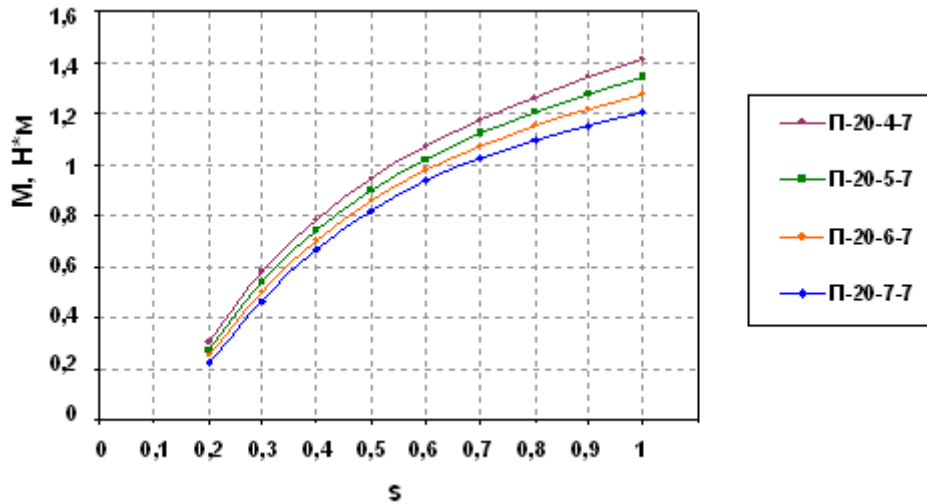


Рисунок 4 – Семейство механических характеристик ПЭМП с ППР при различных значениях n ($Z_2 = 20$, $d = 7$ мм)

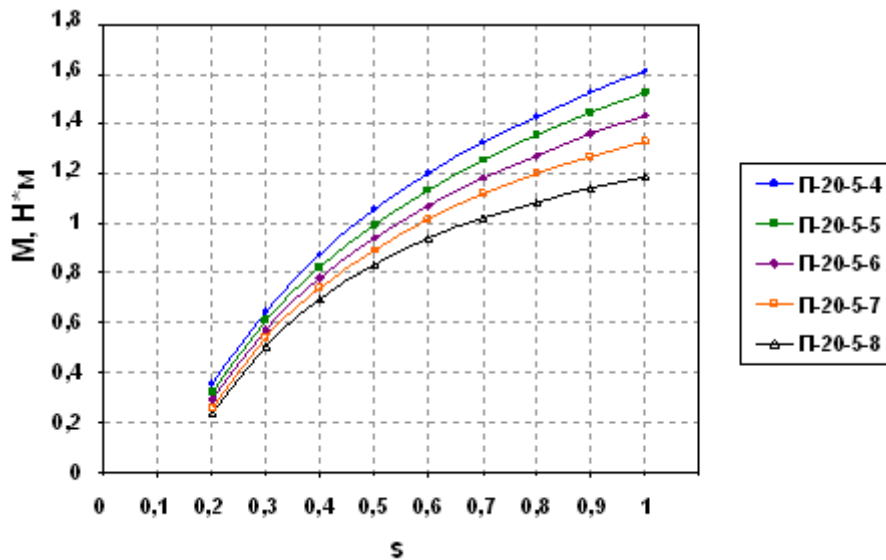


Рисунок 5 – Семейство механических характеристик ПЭМП с ППР при различных значениях d ($Z_2 = 20$, $n = 5$ мм)

Рассмотрим влияние диаметра и количества отверстий в ряду на величину электромагнитного момента ПЭМП на примере ротора с числом рядов отверстий $Z_2 = 20$. На рисунке 6 и рисунке 7 в виде графиков поверхности представлены зависимости соответственно $M_H^* = f(d; n)$ и $M_{II}^* = f(d; n)$ при варьировании диаметра и количества отверстий в ряду. В соответствии с полученными зависимостями, выбор числа отверстий в ряду $n = (1 \dots 4)$, диаметром $d = (1 \dots 4)$ мм приводит к снижению номинального момента не более чем на 6 %, а пускового не более чем на 8 %. Выбор $n = 7$ при $d = 8$ мм, приведет к снижению номинального и пускового момента на 35 % и 40 % соответственно.

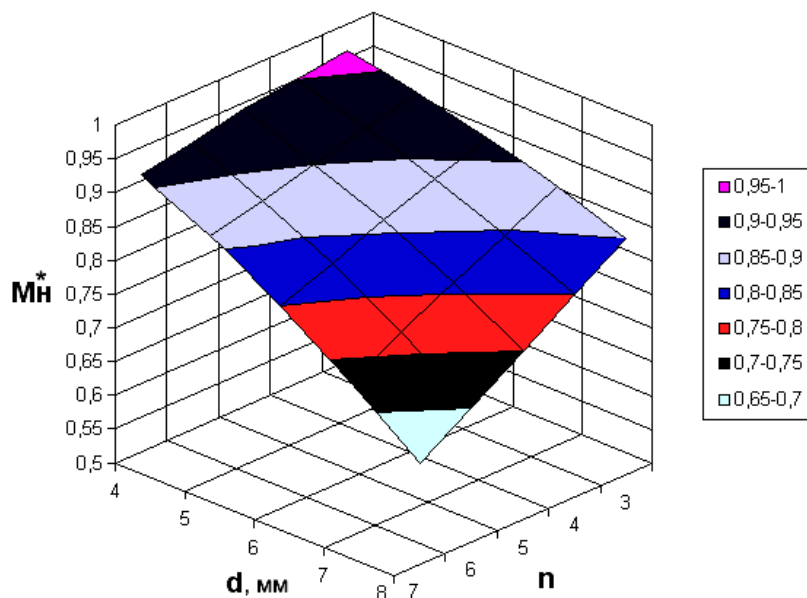


Рисунок 6 – Значения M_n^* при варьировании диаметра и количества отверстий в ряду ($Z_2 = 20$)

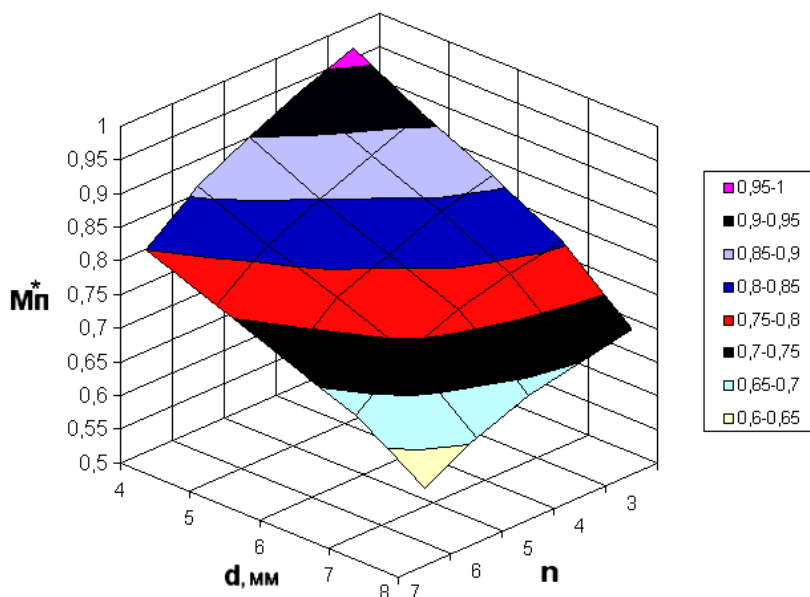


Рисунок 7 – Значения M_n^* при варьировании диаметра и количества отверстий в ряду ($Z_2 = 20$)

Серия расчетов для различных значений параметра n показала, что величина шага перфораций в ряду при прочих равных условиях не оказывает влияния на механическую характеристику ПЭМП с ППР.

Наряду с ППР имеющим прямые ряды отверстий, практический интерес представляет использование ППР, отверстия которого выполнены рядами со скосом, а так же в шахматном порядке. На рисунке 8 представлено семейство механических характеристик ПЭМП, ротор ко-

того имеет скошенные ряды отверстий ($Z_2 = 20$, $\alpha = 30^\circ$) для различных значений n и d . Семейство механических характеристик ПЭМП для ротора с шахматным расположением отверстий ($Z_2 = 40$) при варьировании тех же параметров представлено на рисунке 9. Как и в случае с ППР, имеющим прямые ряды, чем меньше значения n и d , тем выше проходит соответствующая механическая характеристика.

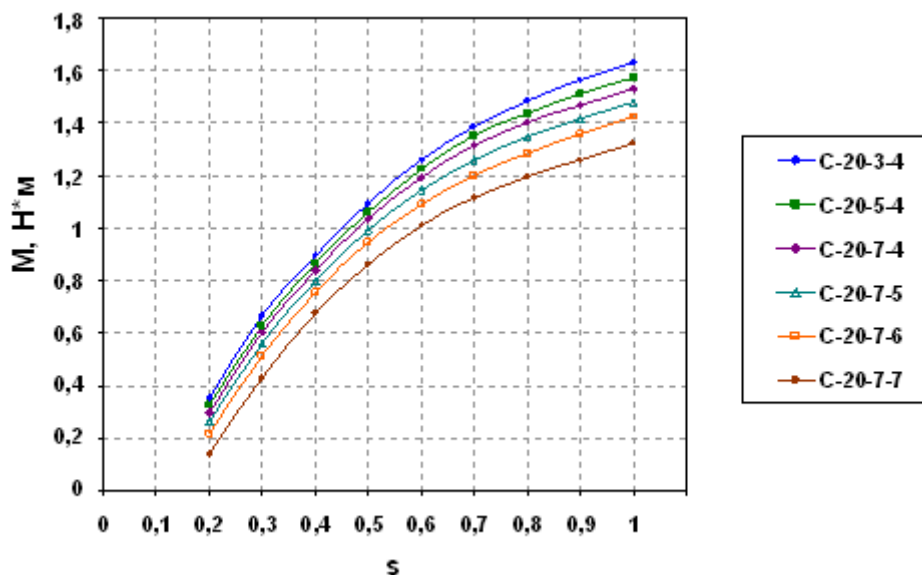


Рисунок 8 – Семейство механических характеристик ПЭМП с ППР при различных значениях n и d ($Z_2 = 20$, $\alpha = 30^\circ$)

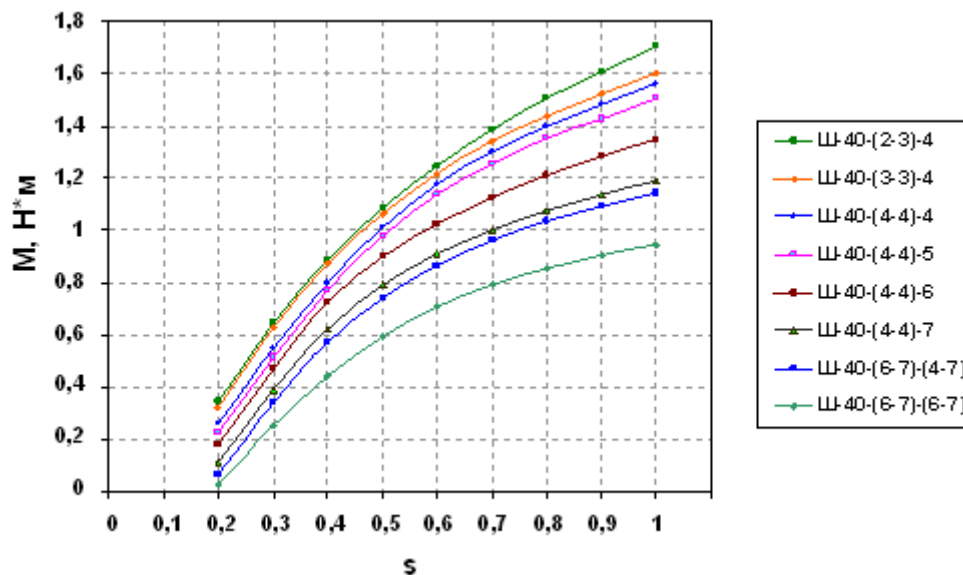


Рисунок 9 – Семейство механических характеристик ПЭМП с ППР при различных значениях n и d ($Z_2 = 40$)

Из рассмотрения всех механических характеристик следует, что введение перфораций ротора воздействует на механическую характеристику ПЭМП подобно понижению напряжения на зажимах обмотки статора. Физически такой результат объясняется тем, что увеличение общей площади отверстий приводит к росту магнитного сопротивления ротора и, как следствие к снижению магнитного потока и активного тока ротора.

Для определения влияния степени перфорации ротора на величину вращающего момента ПЭМП воспользуемся понятием коэффициента перфорации, который определяется следующим образом:

$$k_{перф} = \frac{S_{перф}}{S_{рот}},$$

где $S_{перф}$ – суммарная площадь перфораций ротора;

$S_{рот}$ – площадь наружной поверхности эквивалентного гладкого ротора.

На рисунке 10 представлены графики, содержащие в относительных единицах данные о доле номинального и пускового момента для некоторых конструктивных вариантов ППР по отношению к номинальному и пусковому моменту двигателя с полым гладким ротором. Графики показывают, что существует обратная зависимость между моментом и коэффициентом $k_{перф}$. При этом, кривые относительного номинального момента с высокой точностью аппроксимируются соответствующими зависимостями $M_n^* = 1 - k_{перф}$ (на графиках показаны штриховой линией).

Экспериментально установлено, что отмеченная закономерность справедлива для подавляющего большинства рассмотренных вариантов ППР в широком диапазоне изменения $k_{перф}$ (0,02...0,6). Дальнейшее увеличение $k_{перф}$ приводит к существенному изменению теплового режима двигателя, что сказывается на его механической характеристике и затрудняет оценку экспериментальных данных.

Экспериментальный стенд и необходимое оборудование для проведения физического исследования механических характеристик ПЭМП с ППР показаны на рисунке 11. Для измерения электромагнитного момента ПЭМП использовалась экспериментальная методика, предложенная в [9]. Изменение момента нагрузки осуществлялось путем изменения тока возбуждения генератора постоянного тока. В процессе эксперимента нагружать исследуемый ПЭМП с помощью генератора постоянного тока до скольжений близких к 1 (режим КЗ) практически не удавалось. Поэтому значение пускового момента определялось с помощью

динамометра, а участок механической характеристики, соответствующий скольжениям 0,8...1 строился путем продолжения экспериментально полученной кривой.

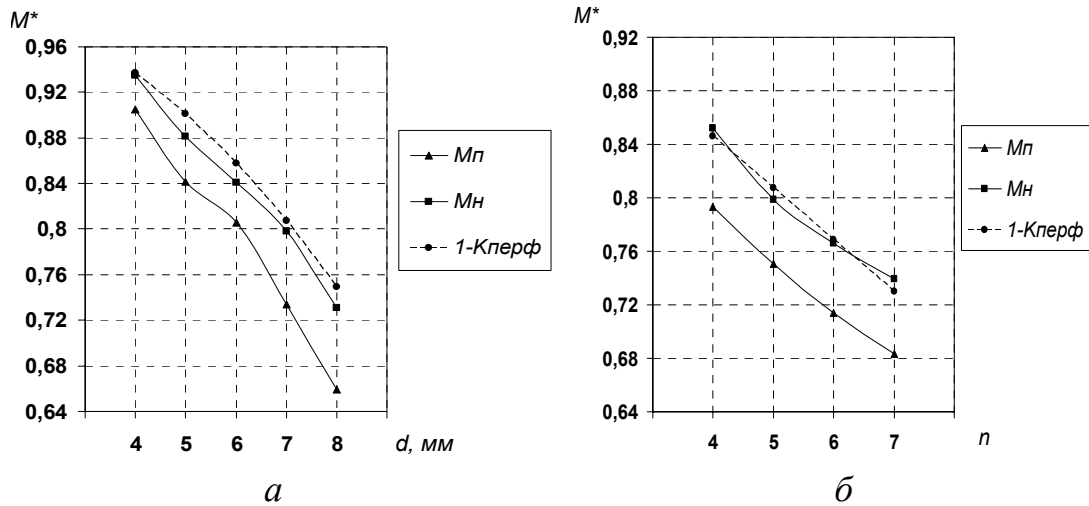


Рисунок 10 – Значения M_{II}^* и M_{II}^*
 а – при изменении d (прямые ряды, $Z_2 = 20, n = 5$);
 б – при изменении n (прямые ряды, $Z_2 = 20, d = 7$).

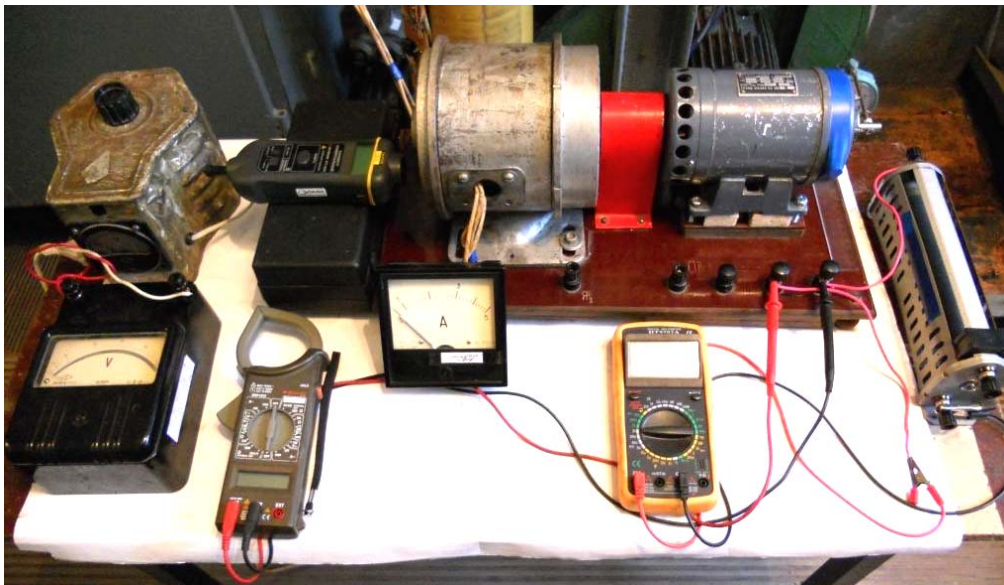


Рисунок 11 – Экспериментальное исследование механических характеристик ПЭМП с ППР

В качестве ППР использовалась конструкция, позволяющая выполнять замену полого цилиндра. Крепление цилиндра на валу осуществлялось с помощью двух фиксирующих гаек и двух ферромагнитных

дисков. Каждый диск выполнен в виде тонкого кольца с радиальными спицами, что позволяет свести к минимуму шунтирующее воздействие «дна» ротора. Полый перфорированный цилиндр, ферромагнитный диск, а также вал ротора представлены на рисунке 12.



Рисунок 12 – Полый перфорированный цилиндр, ферромагнитный диск и вал ротора

Экспериментальные механические характеристики ПЭМП были получены с использованием различных конструктивных исполнений ППР, представленных на рисунке 13.

Сопоставление результатов эксперимента с расчетными характеристиками показало, что расхождения во всем исследуемом диапазоне изменения скольжений не превышают 4-8%, в зависимости от степени перфорации ППР. Такое расхождение, по-видимому, вызвано погрешностью задания исходных данных, т.е. отклонением реальных магнитных и электрических свойств материалов от принятых в основу расчета. Несовершенство геометрии реальной конструкции ПЭМП с ППР и анизотропия материалов также могут приводить к погрешности. Одновременно, точность метода конечных элементов зависит от правильного выбора типа и размера конечных элементов. Погрешность постановки задачи возникает при несоответствии выбранного типа элемента физическому поведению материала в конструкции. Погрешность дискретизации возникает при замене реальной конструкции ограниченным числом конечных элементов.

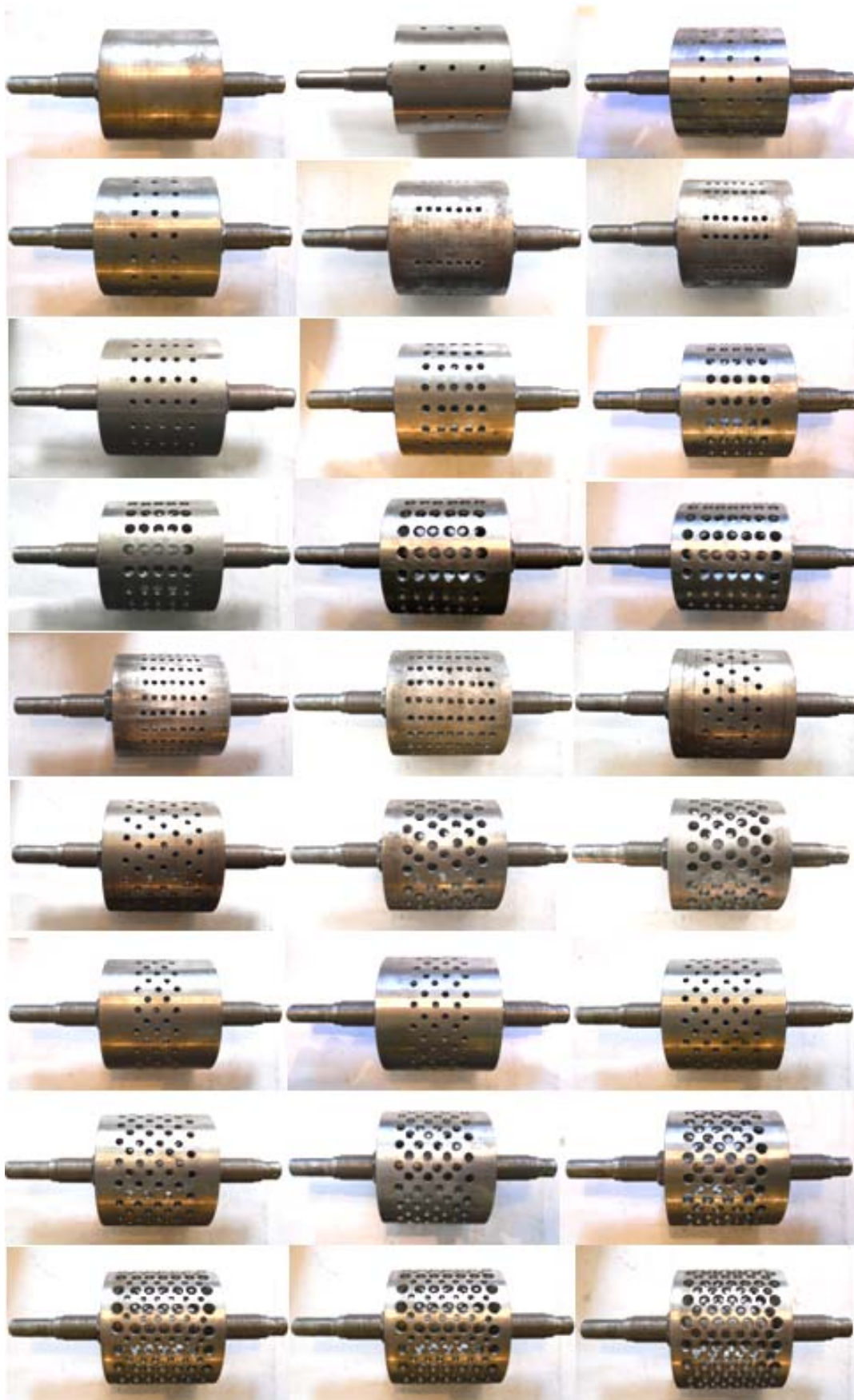


Рисунок 13 – Конструктивные исполнения ППР

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Предложен подход к расчету электромагнитного поля и механических характеристик ПЭМП с ППР, сущность которого заключается в послойной дискретизации участков трехмерной конечно-элементной модели с целью получения необходимого количества слоев КЭ.

Данный подход опробован путем сопоставления расчетных и опытных данных полученных для физической модели ПЭМП с ППР.

2. В результате многовариантных конечно-элементных расчетов впервые получены семейства механических характеристик ПЭМП при различных схемах перфорации ППР, а также при различных значениях его конструктивных параметров.

3. На базе численных и физических экспериментов установлена закономерность, определяющая влияние степени перфорации полого ферромагнитного ротора на величину электромагнитного момента.

Библиографический список

1. *Заблодский Н.Н. Исследование распределения электромагнитных и тепловых полей в электротепломеханическом преобразователе энергии / Заблодский Н.Н. // Сборник научных трудов ДонГТУ. - Алчевск: ДонГТУ, 2006. - Вып. 21. - С. 231-248.*

2. *Рымиша В.В. Математическое моделирование индукторных линейных двигателей постоянного тока / Рымиша В.В., Радимов И.Н., Меркулов И.В. // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы, 2005. - №15. - С. 80-84.*

3. *Howe D. The influence of finite element discretisation on the prediction of cogging torque in permanent magnet excited motors / Howe D., Zhu Z. // IEEE Transactions on magnetics, 1992. - vol. 28. - №2. - pp. 1371-1374.*

4. *Qiao J. Calculation and error analysis of electromagnetic torque for a wheel permanent-magnet motor / Qiao J., Cai W. // IEEE Transactions on industry application. - 2006. - vol. 42. - №5. - pp. 1151-1161.*

5. *Заблодский Н.Н. Численное моделирование электромагнитных полей в полифункциональных электромеханических преобразователях с полым перфорированным ротором / Заблодский Н.Н., Филатов М.А., Грицюк В.Ю. // Електротехніка і Електромеханіка, 2012. - №1. - С. 25-27.*

6. *Тейн Хаинг Тун. Применение полевых методов в электромагнитных расчетах электрических машин: диссертация кандидата технических наук: 05.09.01 / Тейн Хаинг Тун. – Москва, 2010. - 150 с.*

7. *Вольдек А.И. Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин / Вольдек А.И., Данилевич Я.Б. - Л.: Энергоатомиздат, 1983. - 213 с.*

8. *Henrotte F. The eggshell approach for the computations of electromagnetic forces in 2D and 3D / Henrotte F., Deliege G., Hameyer K. // In Proceedings*

of the 6th international symposium on electric and magnetic fields. - Aachen (Germany): EMF, 2003. - pp. 55-58.

*9. Кекот О.В. Об измерении вращающих моментов посредством та-
рированной машины постоянного тока / Кекот О.В., Фильц Р.В. // Мате-
риалы радиоэлектроники и электрические машины. - Львов: Изд-во Львов-
ского университета, 1964. - Вып. 26. - С. 87-91.*

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблудским Н.Н.