

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В ПОЛОМ ПЕРФОРИРОВАННОМ РОТОРЕ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Отримано закони просторового розподілу щільності струму у порожнистому перфорованому роторі у вигляді картин і залежностей. Встановлено залежності активного хвильового опору від ковзання для порожнистого гладкого і перфорованого ротора при різних значеннях конструктивних параметрів. Запропоновано вираз для визначення активного хвильового опору порожнистого перфорованого ротора.

Получены законы пространственного распределения плотности тока в полом перфорированном роторе в виде картин и зависимостей. Установлены зависимости активного волнового сопротивления от скольжения для полого гладкого и перфорированного ротора при различных значениях конструктивных параметров. Предложено выражение для определения активного волнового сопротивления полого перфорированного ротора.

ВВЕДЕНИЕ

Полифункциональные электромеханические преобразователи (ПЭМП) с полым перфорированным ротором (ППР), относятся к новому классу электромеханических устройств. Важным вопросом проектирования ПЭМП с ППР является оценка реального распределения вихревых токов (ВТ), как по толщине, так и вдоль оси ППР. Вместе с тем, именно характер распределения ВТ определяет величину активного сопротивления массивного ротора, которое играет первостепенную роль в формировании выходных характеристик и свойств ПЭМП. Распределение ВТ, индуцированных в массиве ППР, носит сложный характер, установление которого возможно при использовании трехмерной математической модели, учитывающей особенности геометрии массива, эффект вытеснения тока и фактор конечной длины. Необходимо отметить, что создание таких математических моделей представляет значительный интерес в плане совершенствования теории электромеханических преобразователей с массивной вторичной частью.

Ввиду принципиальных особенностей распределения электромагнитного поля в активной зоне ПЭМП с ППР, а также отсутствия работ, рассматривающих влияние перфораций ферромагнитного ротора на параметры и характеристики электромеханических преобразователей, актуальными задачами на пути к формированию единой теоретической базы и созданию методик проектирования ПЭМП с ППР являются:

- установление новых зависимостей и особенностей распределения ВТ в ППР, отражающих реальный трехмерный характер поля;
- определение активного сопротивления ППР и его зависимостей от геометрии массива.

Решение поставленных задач выполнялось с помощью конечно-элементной модели, построенной в программе Comsol Multiphysics 3.5a и представленной в работах [1, 2]. Расчеты проводились для экспериментального образца ПЭМП, изготовленного на базе серийного асинхронного двигателя, с учетом реальных линейных размеров активной зоны: наружный диаметр статора – 140 мм; внутренний диаметр статора – 88 мм; наружный диаметр ротора – 85 мм; длина активной части – 75 мм. Конкретный набор исходных данных расчета (значений тока фазы статора при соответствующих скольжениях) зависит от параметров вторичного контура и определялся экспериментально для каждого конструктивного варианта ротора.

Для расчетов использовался ПК на базе 4-х ядерного процессора AMD Phenom II X4 955, работающего на частоте 3,2 ГГц. Данный процессор показал высокие результаты по итогам тестирования на про-

изводительность при работе с пакетами трехмерного моделирования [3]. При объеме оперативной памяти – 4 Гб время расчета модели составило 4 часа.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При анализе электромагнитных полей с применением трехмерных конечно-элементных моделей существенно возрастают требования к точности решения. На первом этапе исследований выполнялось трехмерное моделирование распределения ВТ в сплошном ферромагнитном роторе. Затем сопоставлялись расчетные картины плотности ВТ в поперечном сечении с соответствующими картинками, полученными другими авторами при решении двухмерных полевых задач для машин со сплошным ферромагнитным ротором. На рис. 1 представлена картина мгновенного распределения z -компоненты (осевой составляющей) плотности ВТ в поперечном сечении сплошного ферромагнитного ротора при $s = 0,1$. Программный комплекс Comsol Multiphysics предоставляет широкие возможности анализа полученных результатов на основе универсальных способов визуализации решения трехмерных задач. В частности, на рис. 2 представлена пространственная картина распределения плотности ВТ в виде поперечного среза (выполненного посередине длины сплошного ротора) совместно с линиями тока. В случае отображения плотности ВТ в виде линий тока, последние будут совпадать с классическими "контурами" ВТ. Справа на этом же рисунке отдельно показаны линии тока, цвет которых соответствует определенному значению полной плотности ВТ.

В целом полученный характер распределения плотности ВТ в поперечном сечении сплошного ротора качественно и количественно соответствует результатам расчетов двухмерных моделей [4-6].

Учитывая большое разнообразие всевозможных конструктивных вариантов ППР, в дальнейшем изложении ограничимся представлением некоторых результатов исследования, полученных при решении трехмерной полевой задачи для ПЭМП с гладким и перфорированным ротором. На рис. 3, 4 представлены картины мгновенного распределения плотности ВТ в поверхностном слое соответственно гладкого и перфорированного полого ротора при $s = 0,2$. Представленный ППР имеет 20 прямых рядов по 5 отверстий, диаметром 7 мм. Размер векторов на рисунках пропорционален величине полной плотности ВТ, а его z -компонента определяется в соответствии с оттенком цветовой заливки на поверхности ротора.

Отметим основные особенности распределения ВТ в перфорированном ферромагнитном роторе.

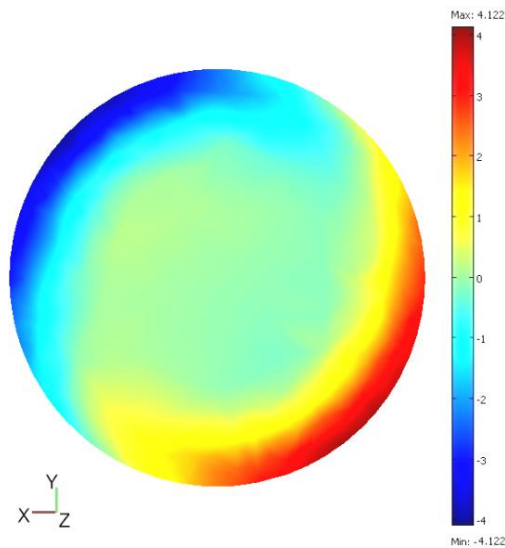


Рис. 1. Картина распределения z-компоненты плотности ВТ (A/mm^2) в поперечном сечении сплошного ферромагнитного ротора при $s = 0,1$

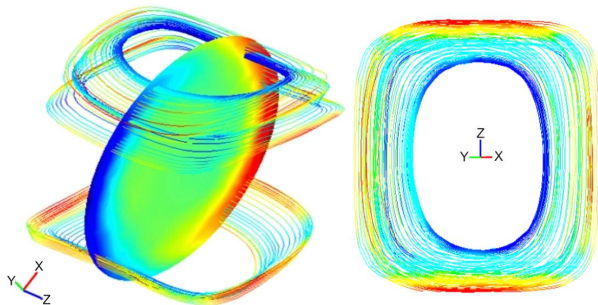


Рис. 2. Распределение z-компоненты плотности ВТ в виде среза в поперечном сечении совместно с линиями тока (слева) и фрагмент линий тока (справа)

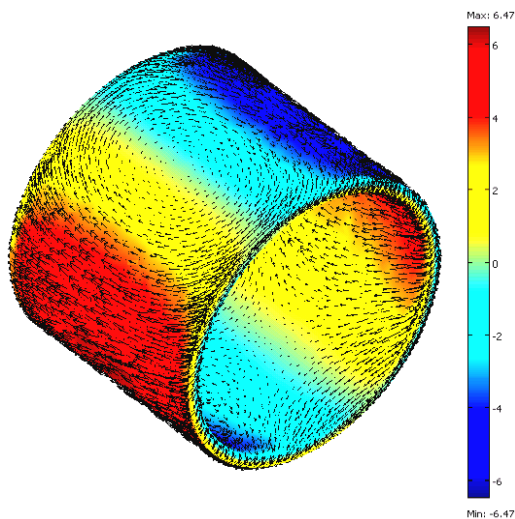


Рис. 3. Картина распределения плотности ВТ (A/mm^2) в полом гладком роторе

В данном режиме частота тока в роторе составляет 10 Гц, при этом в пределах одного полюсного деления максимум полной плотности ВТ составил $10,05 A/mm^2$, а минимум $0,07 A/mm^2$ на внешней и внутренней поверхностях полого ротора соответственно. За исключением "краевых" участков ротора, где преобладает поперечная составляющая ВТ, а также участков "входа" магнитного потока в ротор, ВТ имеет преимущественно аксиальное направление.

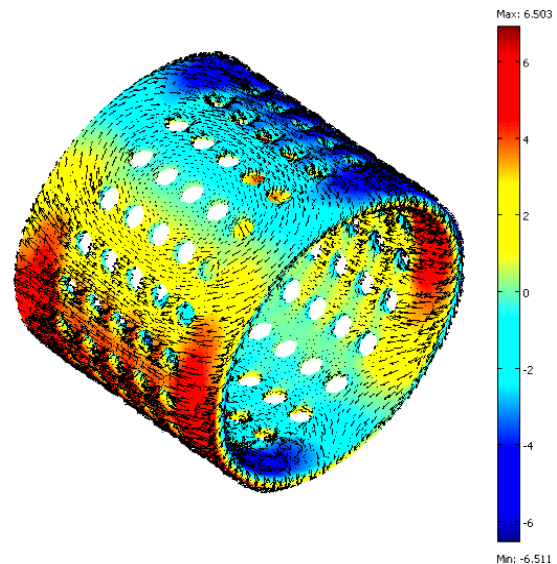


Рис. 4. Картина распределения плотности ВТ (A/mm^2) в полом перфорированном роторе (П-20-5-7)

Полученная картина токораспределения сочетает в себе контуры ВТ в виде эллипсов, а также контуры в виде прямоугольников с закругленными углами. Такое распределение является промежуточным по отношению к двум предельным случаям, рассмотренным в [7], при малой и большой частоте тока в полом роторе. Действительно, для рассматриваемого случая, выражение, определяющее характер распределения ВТ в роторе имеет вид:

$$\frac{\Delta}{\delta} \mu_0 \gamma \omega \approx (\pi/\tau)^2, \quad (1)$$

где Δ – толщина ротора; δ – эквивалентный воздушный зазор; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; γ – удельная электрическая проводимость материала ротора; ω – частота тока в роторе; τ – полное деление.

Также наблюдаются контуры, которые через торцы замыкаются по внутренней поверхности полого цилиндра, и практически не имеют поперечной составляющей ВТ. Величина плотности ВТ в середине активной длины ротора, непосредственно под "полусами" стремится к нулю.

Поперечный краевой эффект проявляется слабо. Это обусловлено малой частотой ВТ, при которой его вытеснение к "краевым" участкам ротора незначительно. Расчеты, проведенные для ППР, показали, что с ростом скольжения картина токораспределения меняется, происходит вытеснение тока к краям цилиндра. Распределение полной плотности ВТ по длине ротора (вдоль аксиальной линии, проходящей по середине полюса) для различных значений скольжения показано на рис. 5. Такой характер распределения ВТ по длине ротора хорошо согласуется с картинками распределения тока, полученными расчетным путем в [8] для полого ротора в предположении, что плотность ВТ по толщине цилиндра и радиальная составляющая напряженности магнитного поля не изменяются.

Рассмотрим более детально картину распределения z-компоненты плотности ВТ в поперечном сечении ППР, проходящем посередине его активной длины при $s = 0,2$ (рис. 6). На рисунке видно, что составляющая ВТ, перпендикулярная плоскости рисунка протекает в двух противоположных направлениях, образуя тем самым контуры протекания тока. При этом наблюдаются участки ротора, где на его поверхности протекают токи одного направления, а на неко-

торой глубине протекают затухающие токи, направленные противоположно. Это же подтверждается присутствием экстремумов на графике распределения полной плотности ВТ по глубине ротора (рис. 7), который построен вдоль радиальной линии, проходящей через точку "max 1". Точки "max 1" и "max 2", отмеченные на рис. 6, – точки на наружной поверхности ротора в которых z -компонента плотности ВТ достигает максимального значения.

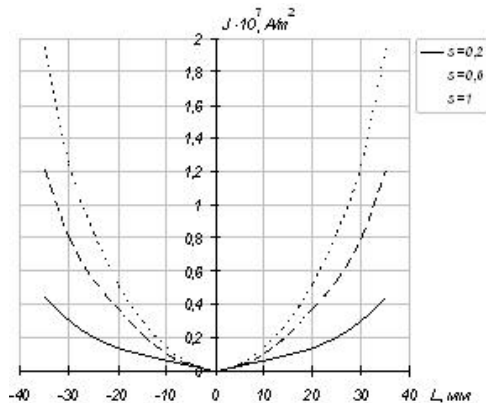


Рис. 5. Распределение полной плотности ВТ по длине ППР при $s = 0,2; 0,6; 1$

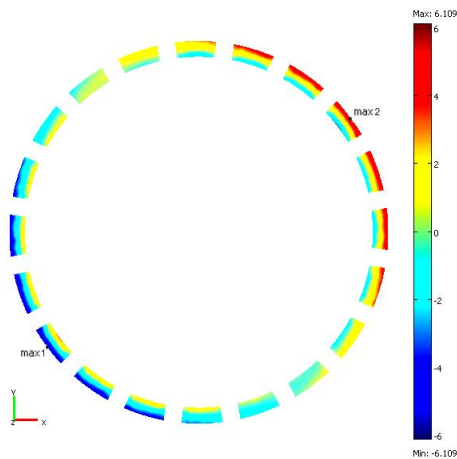


Рис. 6. Картина распределения z -компоненты плотности ВТ (А/мм^2) в поперечном сечении ППР при $s = 0,2$

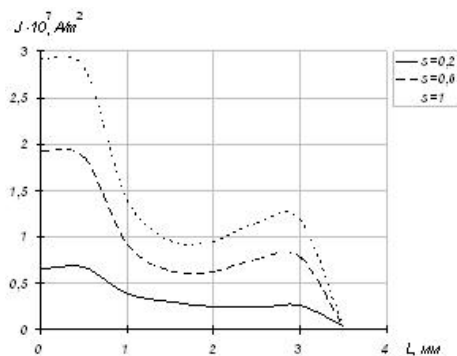


Рис. 7. Распределение полной плотности ВТ по глубине ППР при $s = 0,2; 0,6; 1$

Постпроцессорная функция Subdomain Integration вышеупомянутого программного комплекса позволяет выполнять количественную оценку для отдельных пространственных составляющих по различным физическим величинам. В табл. 1 приведены соотношения z -компоненты и полной плотности ВТ, полученные для некоторых конструктивных вариантов роторов ПЭМП.

Для удобства использованы краткие обозначения конструктивных вариантов ППР. Например, обозначению П-20-3-4, соответствует ротор, имеющий 20 прямых рядов по 3 отверстия диаметром 4 мм.

Расчеты, проведенные при $s = 0,2$ показали, что расхождение соотношений J_z / J_Σ для различных схем перфорации ротора находятся в пределах расчетной погрешности, что не дает права утверждать о непосредственном влиянии типа схемы перфорации ротора на интегральное перераспределение пространственных составляющих плотности тока и, соответственно, активное сопротивление ротора.

На рис. 8 представлена зависимость активного волнового сопротивления сплошного ферромагнитного ротора от скольжения.

Таблица 1

Конструктивное исполнение ротора	J_z / J_Σ
Без отверстий	0,661
П-8-7-4	0,682
П-20-3-4	0,670
П-20-5-7	0,679
С-20-5-4	0,683
Ш-40-4-5	0,659

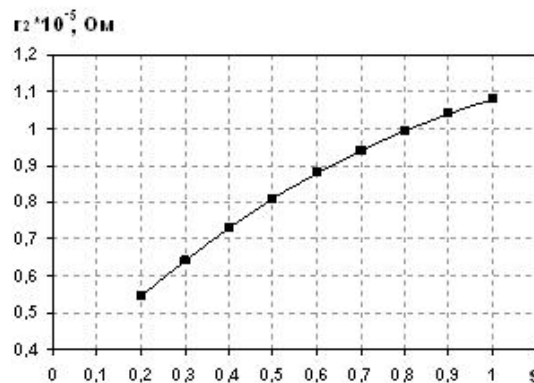


Рис. 8. Зависимость $r_a = f(s)$ для сплошного ферромагнитного ротора

Значения сопротивления для различных значений скольжения (выраженного через частоту токов в пазах статора) получены по результатам решения уравнений квазистационарного электромагнитного поля, исходя из величины мощности резистивных потерь Q_r и квадрата полного тока ротора I_Σ^2 :

$$r_a = \frac{Q_r}{I_\Sigma^2} = \frac{\int_V \left(\frac{J_\Sigma^2}{\gamma} \right) dV}{\left(\int_V J_\Sigma dV / l_a \right)^2}, \quad (2)$$

где J_Σ – полная плотность ВТ ротора; l_a – активная длина ротора.

Результаты расчета зависимости $r_a = f(s)$ для сплошного ротора показали хорошее согласование с ранее установленными зависимостями [9, 10]. По мере разгона асинхронного двигателя со сплошным ферромагнитным ротором, частота переменного магнитного потока в роторе уменьшается, а толщина слоя, в котором протекают ВТ, увеличивается. При этом величина активного сопротивления уменьшается практически пропорционально \sqrt{s} .

Зависимости $r_a = f(s)$ для полых ферромагнитных роторов с различной толщиной стенки представлены на рис. 9. Из полученных результатов следует, что

при толщине стенки цилиндра 10 мм активное волновое сопротивление ротора на участке $s = 1 \dots 0,7$ незначительно превышает сопротивление сплошного ротора. При дальнейшем увеличении скорости сопротивление полого ротора снижается менее интенсивно, что связано с невозможностью дальнейшего увеличения токопроводящего слоя. В результате, зависимость $r_e = f(s)$ приобретает почти линейный характер.

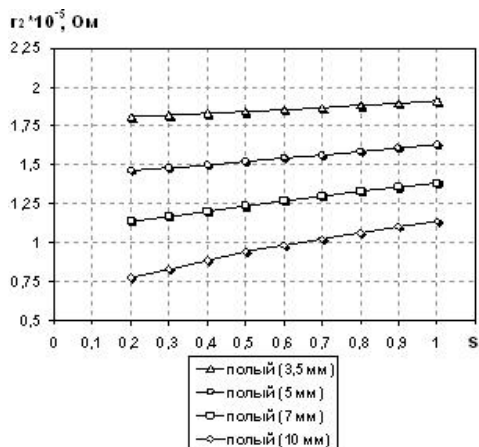


Рис. 9. Зависимости $r_e = f(s)$ для полых ферромагнитных роторов

С уменьшением толщины стенки ротора соответствующая зависимость $r_e = f(s)$ проходит выше и становится более пологой. Так, активное волновое сопротивление полого ротора с толщиной стенки 3,5 мм, мало зависит от скольжения и, при $s = 1$ в 1,75 раза превышает активное сопротивление сплошного ротора. В этом случае, толщина слоя в котором протекают ВТ, равна толщине стенки цилиндра практически во всем диапазоне изменения скольжения. При пуске частота ВТ в роторе составляет 50 Гц, а глубина проникновения тока в тело ротора – 2...3 мм, что на первый взгляд должно обуславливать равенство значений r_e для полого и сплошного роторов при $s = 1$. Однако сопротивление ротора резко увеличивается при малых торцовых поверхностях, что особенно сказывается в роторе без дна [8].

На рис. 10 представлены зависимости $r_e = f(s)$ для ППР с толщиной стенки 3,5 мм. Введение перфораций ротора приводит к перемещению зависимости $r_e = f(s)$ параллельно вверх. При этом основное влияние на величину активного сопротивления оказывает коэффициент перфорации ротора $k_{перф}$ – отношение суммарной площади перфораций к площади наружной поверхности аналогичного гладкого ротора. Из рис. 10 видно, что зависимости $r_e = f(s)$ для роторов с прямыми рядами, одинаковым диаметром отверстий, но различным количеством рядов и числом отверстий в ряду, проходят параллельно одна другой. При этом значения $k_{перф}$ практически равны (0,035 и 0,037), а разница в сравнении с сопротивлением гладкого ротора составляет $\approx 3 \dots 4 \%$. На этом же рисунке представлена зависимость $r_e = f(s)$ для ротора, имеющего скос рядов отверстий $\alpha = 30^\circ$ и $k_{перф} = 0,063$. В данном случае превышение сопротивления по сравнению с гладким ротором составляет $\approx 7 \dots 9 \%$. На рис. 11 представлены зависимости $r_e = f(s)$ для ротора с прямыми рядами и ротора с шахматным расположением отверстий, имеющих повышенный $k_{перф} = 0,192$ и 0,157 соответственно.

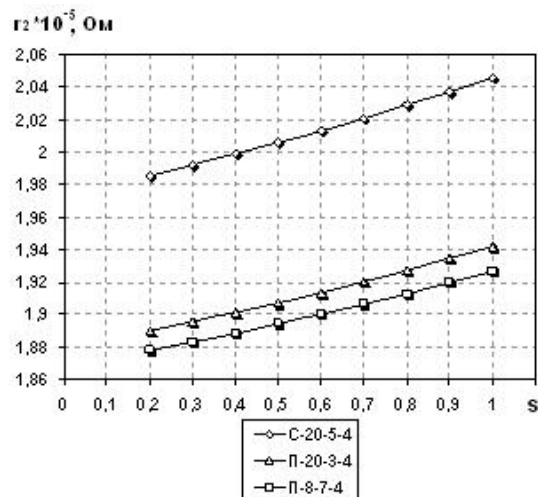


Рис. 10. Зависимости $r_e = f(s)$ для ППР

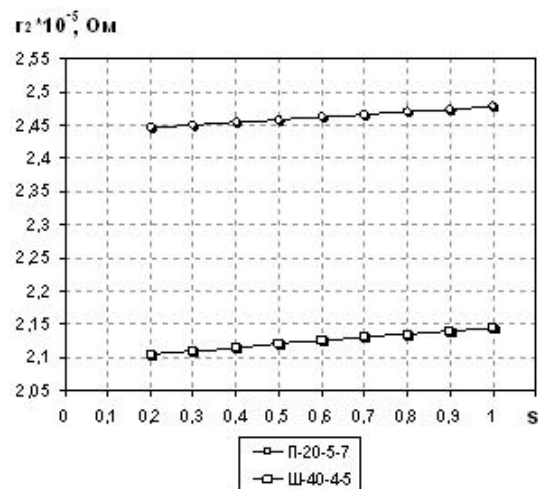


Рис. 11. Зависимости $r_e = f(s)$ для ППР с повышенным $k_{перф}$

Полагаясь на анализ полученных зависимостей, для расчета активного волнового сопротивления ППР может быть рекомендовано следующее выражение:

$$r_{en} = r_{e2} \cdot (1 - k_{перф})^{-1}, \quad (3)$$

где r_{e2} – активное волновое сопротивление полого гладкого ротора; $k_{перф}$ – коэффициент перфорации ротора.

Активное сопротивление полого ферромагнитного (гладкого) ротора с хорошей точностью определяется по выражению, приведенному в [7]. Формула (3) дает удовлетворительные результаты (расхождение с полученными зависимостями до 4 %) для различных типов схем перфорации с равномерным расположением отверстий в диапазоне изменения $k_{перф} = 0,02 \dots 0,4$.

Непосредственное влияние типа схемы перфорации ротора на активное сопротивление ротора проявляется при явно неравномерном расположении отверстий и затрудняет использование формулы (3). Например, выполнение отверстий диаметром 5 мм двумя плотными кольцевыми рядами (по 32 отверстия) на расстоянии 10 мм от краев полого цилиндра приводит к снижению соотношения J_z / J_c до значения 0,58. Увеличение активного сопротивления по сравнению с полым гладким ротором составляет 15 %, а по сравнению с ППР, имеющим такой же коэффициент перфорации (С-20-5-4) – 6 %. Зависимость $r_e = f(s)$ для данного конструктивного варианта ППР представлена на рис. 12.

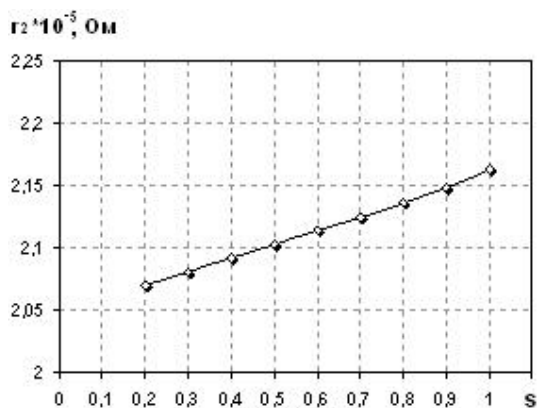


Рис. 12 Зависимость $r_6 = f(s)$ для случая расположения отверстий в "краевых" зонах ротора

ВЫВОДЫ

Предложен подход к анализу распределения вихревых токов в полом перфорированном роторе, а также к определению его активного волнового сопротивления на базе трехмерной математической модели полифункционального электромеханического преобразователя энергии. Модель учитывает все особенности геометрии перфорированного ротора, влияние краевого эффекта, а также эффекта вытеснения тока.

В результате проведенных численных исследований получены законы пространственного распределения плотности тока в полом перфорированном роторе в виде картин и зависимостей.

Установлены зависимости активного волнового сопротивления от скольжения для полого гладкого и перфорированного ротора при различных значениях конструктивных параметров. Предложено выражение для определения активного волнового сопротивления полого перфорированного ротора.

Рассмотренная конечно-элементная модель может быть использована при анализе электромагнитных полей в электромеханических преобразователях со сложной вторичной частью. Это позволит учесть реальный трехмерный характер поля (вызванный особенностями конструкции и конечными осевыми размерами) и, соответственно, получить более адекватную расчетную информацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заблодский Н.Н. Численное моделирование электромагнитных полей в полифункциональных электромеханических преобразователях с полым перфорированным ротором / Н.Н. Заблодский, М.А. Филатов, В.Ю. Грицюк // *Электротехника и электромеханика*. – 2012. – № 1. – С. 25-27.
2. Грицюк В.Ю. Исследование механических характеристик полифункциональных электромеханических преобразователей с полым перфорированным ротором / В.Ю. Грицюк // *Сб. науч. тр. ДонГТУ*. – Алчевск: ДонГТУ. – 2012. – Вып. 37. – С. 338-352.
3. Платформа ПК: Процессоры [электронный ресурс] / Дмитрий Лаптев // Проект iXBT.com – Режим доступа к источнику: <http://www.ixbt.com/cpu/amd-phenom-2-x4-940.shtml>.
4. Кручинина И.Ю. Поисковые исследования характеристик и свойств специальных типов асинхронных машин с массивным ротором на основе наноматериалов: дис. канд. техн. наук: спец. 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты" / Кручинина Ирина Юрьевна. – Санкт-Петербург, 2006. – 118 с.

5. Тейн Наинг Тун. Применение полевых методов в электромагнитных расчетах электрических машин: диссертация кандидата технических наук: 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты" / Тейн Наинг Тун. – Москва, 2010. – 150 с.
6. Васьковский Ю.М. Польвовий анализ електричних машин / Юрій Миколайович Васьковський – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 191 с.
7. Лопухина Е.М. Асинхронные микромашины с полым ротором / Лопухина Е.М., Сомихина Г.С. – М.: Энергия, 1967. – 488 с.
8. Вевюрко И.А. Расчет характеристик двухфазной индукционной машины с учетом токораспределения в роторе / И.А. Вевюрко // *Вестник электропромышленности*. – 1957. – № 6. – С. 34-39.
9. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы в электрических машинах / Постников И.М. – М.: Высшая школа, 1975. – 319 с.
10. Куцевалов В.И. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами / Куцевалов В.И. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 302 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zablodskij N.N. Chislennoe modelirovanie `elektromagnitnyh polej v polifunktional'nyh `elektromehaničeskikh preobrazovatelyah s polym perforirovannym rotorom / N.N. Zablodskij, M.A. Filatov, V.Yu. Gričyuk // *Elektrotehnika i elektromehaničeska*. - 2012. - № 1. - S. 25-27. 2. Gričyuk V.Yu. Issledovanie mehanicheskikh harakteristik polifunktional'nyh `elektromehaničeskikh preobrazovatelej s polym perforirovannym rotorom / V.Yu. Gričyuk // *Sb. nauch. tr. DonGTU*. - Alčevsk: DonGTU. - 2012. - Vyp. 37. - S. 338-352. 3. Platforma: Processory [elektronnyj resurs] / Dmitrij Laptev // Projekt iXBT.com - Rezhim dostupa k istočniku: <http://www.ixbt.com/cpu/amd-phenom-2-x4-940.shtml>. 4. Kruchinina I.Yu. Poiskovyje issledovaniya harakteristik i svojstv special'nyh tipov asinhronnyh mashin s massivnym rotorom na osnove nanomaterialov: dis. kand. tehn. nauk: spec. 05.09.01 "Elektromehaničeska i `električeskie apparaty" / Kruchinina Irina Jur'evna. - Sankt-Peterburg, 2006. - 118 s. 5. Tejn Naing Tun. Primenenie polevyh metodov v `elektromagnitnyh rasčetah `električeskikh mashin: dissertacija kandidata tehničeskikh nauk: 05.09.01 "Elektromehaničeska i `električeskie apparaty" / Tejn Naing Tun. - Moskva, 2010. - 150 s. 6. Vas'kovskij Ju.M. Pol'ovij analiz električnyh mashin / Jurij Mikołajovič Vas'kovskij - K.: NTUU "KPI", 2007. - 191 s. 7. Lopuhina E.M. Asinhronnye mikromashiny s polym rotorom / Lopuhina E.M., Somihina G.S. - M.: `Energiya, 1967. - 488 s. 8. Vevyurko I.A. Rasčet harakteristik dvuhfaznoj indukcionnoj mashiny s učetom tokoraspredeleeniya v rotore / I.A. Vevyurko // *Vestnik `elektropromyšlennosti*. - 1957. - № 6. - S. 34-39. 9. Postnikov I.M. Obobščennaya teorija i perehodnye processy v `električeskikh mashinah / Postnikov I.M. - M.: Vysshaya shkola, 1975. - 319 s. 10. Kucevalov V.I. Voprosy teorii i rasčeta asinhronnyh mashin s massivnymi rotorami / Kucevalov V.I. - M. - L.: `Energiya, 1966. - 302 s.

Поступила 24.10.2012

*Заблодский Николай Николаевич, д.т.н., проф.,
Грицюк Владимир Юрьевич,
Кульдыркаев Илья Николаевич*
Донбасский государственный технический университет
кафедра "Электрические машины и аппараты"
94204, Луганская обл., Алчевск, пр. Ленина, 16
тел. (06442) 2-05-64, факс (06442) 2-68-87
e-mail: info@dgmi.edu.ua

Zablodskiy N.N., Gričyuk V.Yu., Kuldyrkaev I.N.
Features of eddy current distribution in a hollow perforated rotor of a polyfunctional electromechanical converter.
Laws of spatial current density distribution in a hollow perforated rotor are obtained in the form of images and dependencies. Behavior of wave resistance subject to rotor slip is identified for a hollow smooth and perforated rotor of various design parameters. An expression for the hollow perforated rotor wave resistance determination is introduced.
Key words – polyfunctional electromechanical converter, perforated rotor, eddy current distribution, wave resistance behavior.