

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ ОБМОТКИ РОТОРА КОРОТКОЗАМКНУТОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

На основе трехмерной полевой математической модели проведена параметрическая оптимизация индукционного устройства диагностики дефектов короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя.

Ключевые слова: короткозамкнутая обмотка ротора, асинхронный двигатель, устройство диагностики дефектов, оптимизация параметров.

В настоящее время объем работ по ремонту и плановому техническому обслуживанию серийных асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутой обмоткой ротора (КЗОР) существенно вырос. Связано это, как с постоянным увеличением общего количества работающих АД, так и с тенденцией к продлению сроков их эксплуатации, что в целом ведет к старению парка эксплуатируемых АД. Анализ причин повреждений АД показывает, что около 10...15 % всех отказов АД происходят из-за неисправности КЗОР (обрыв, трещина, ослабление сечения, каверны) (например, [1]), причем дефекты КЗОР достаточно сложно поддаются обнаружению, как при изготовлении и ремонте АД, так и в процессе его эксплуатации. Работа АД с поврежденной КЗОР ведет к появлению ряда негативных эксплуатационных факторов (повышение вибраций, увеличение тока в обмотке статора), что способствует ускоренному повреждению других узлов АД (обмотки статора, подшипников и др.). Поэтому своевременное и достоверное выявление дефектов КЗОР имеет большое значение для обеспечения необходимого уровня надежности АД, что предъявляет высокие требования к методам и системам контроля технического состояния и диагностики дефектов КЗОР.

Индукционный метод диагностики дефектов КЗОР АД и соответствующие устройства диагностики (УД) для его реализации известны достаточно давно [2–4]. Метод используется при изготовлении и ремонте АД и основан на возбуждении токов в элементах конструкции КЗОР (стержнях, короткозамыкающих кольцах) с помощью индуктора УД. При последовательном перемещении ротора относительно УД и появлении в зоне контроля дефектного элемента КЗОР изменяется сигнал измерительной обмотки УД, который регистрируется измерительными приборами. Несмотря на относительную простоту конструкции УД и технологии процесса диагностики, они по ряду причин не нашли достаточного практического применения. На многочисленных ремонтных предприятиях продолжают применяться приближенные методы оценки исправности КЗОР, основанные на тща-

тельном визуальном осмотре ротора с целью выявления разрывов, трещин и других повреждений элементов КЗОР. Такая практика, как было отмечено, ведет к повышенной повреждаемости АД после его ремонта. Поэтому улучшение качества диагностики роторов КЗОР АД на стадии ремонта и при его изготовлении является актуальной научно-технической задачей.

Анализ известных конструкций УД позволил выявить их два основных недостатка. Во-первых, им характерна невысокая чувствительность, особенно при выявлении неразвитых и скрытых дефектов, к которым относятся, например, неполные (неразвитые до полного разрыва) трещины стержней, внутренние каверны. Особенно это проявляется при диагностике АД средней и большой мощности. Во-вторых, известные УД имеют невысокие массогабаритные показатели и не отвечают требованиям максимальной простоты и универсальности. Они разрабатывались на основе приближенных инженерных расчетов без должной оптимизации с использованием уточненных математических моделей. Вследствие этого им характерны значительные магнитные потоки рассеяния, снижающие эффективность работы устройств.

Авторами в работах [5, 6] предложено УД, отличающееся улучшенными массогабаритными показателями.

Целью данной статьи является исследование и оптимизация параметров предложенного УД с помощью разработанной трехмерной полевой математической модели, позволяющей детально проанализировать распределение электромагнитного поля в системе «УД-ротор АД».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ УД

На рис. 1, а изображен общий вид системы «УД-ротор АД», а на рис. 1, б отдельно показано УД. Цифрами обозначены: 1 – магнитопровод УД; 2 – обмотка возбуждения УД, питаемая переменным током; 3 – измерительная обмотка (ИО), в которой формируется диагностический сигнал; 4 – ротор АД. Обмотка возбуждения создает переменный магнитный поток, который через

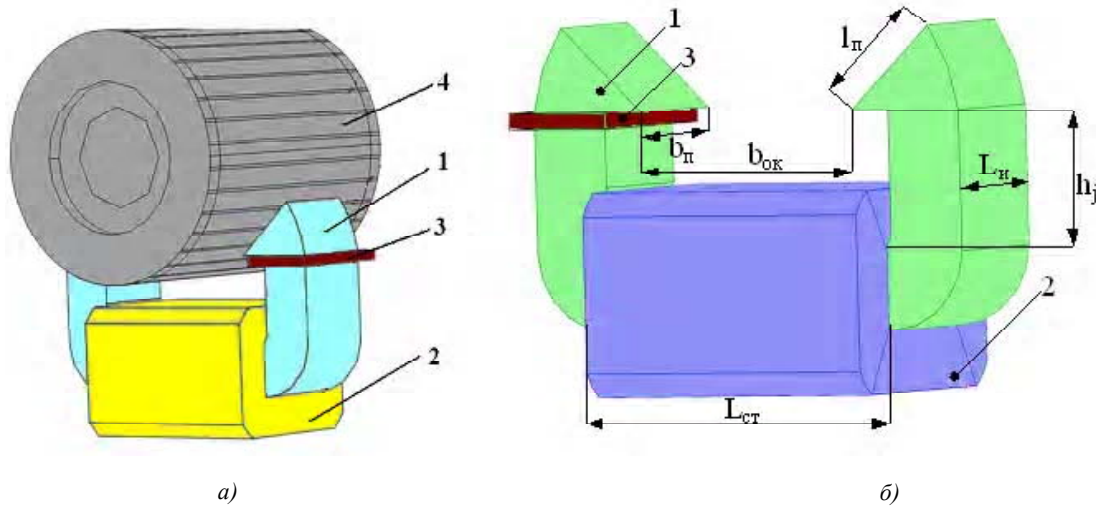


Рис. 1. Общий вид устройства диагностики:

a – общий вид системы «УД-ротор АД»; *б* – основные геометрические размеры УД

полюса магнитопровода УД подводится к исследуемому участку ротора АД и индуцирует в стержнях КЗОР вторичные токи. Этот же поток индуцирует ЭДС в ИО. При последовательном повороте ротора АД и появлении в зоне контроля дефектного стержня КЗОР распределение поля в системе изменяется, что ведет к увеличению потока УД и, как результат, к увеличению ЭДС ИО. На рис. 1, б обозначены основные размеры УД: $L_{СТ}$ – длина стержня магнитопровода обмотки возбуждения; h_j – длина ярма магнитопровода, по которому магнитный поток возбуждения подводится к исследуемому участку ротора АД; $L_{И}$ – ширина ярма магнитопровода вдоль оси ротора АД; $l_{П}$ – длина полюса; $b_{П}$ – ширина полюса; $b_{ОК}$ – расстояние между полюсами УД (ширина зоны контроля).

Для оценки эффективности работы и сравнительного анализа различных конструктивных вариантов УД целесообразно ввести следующие коэффициенты.

1. Коэффициент полезного потока $k_{\Phi} = \Phi_{\delta} / \Phi_f$, равный отношению магнитного потока Φ_{δ} в воздушном зазоре между полюсом УД и ротором АД к магнитному потоку возбуждения Φ_f , который создается обмоткой возбуждения УД и протекает через среднее сечение стержня магнитопровода. Величина коэффициента изменяется в пределах $0 \leq k_{\Phi} \leq 1$.

В идеальном случае этот коэффициент равен 1 (нет потерь потока возбуждения). Однако из-за значительного магнитного рассеяния в системе в действительности его величина оказывается существенно меньше.

2. Коэффициент чувствительности УД $k_e = e_{ИО1} / e_{ИО0}$, равный отношению ЭДС ИО $e_{ИО1}$ при наличии дефектного стержня КЗОР в зоне контроля к ЭДС ИО $e_{ИО0}$ бездефектного ротора. Этот коэффициент непосредственно определяет эффективность диагности-

ки поврежденных стержней УД и имеет значение $k_e \geq 1$.

Задача оптимизации УД состоит в достижении максимально возможных значений коэффициентов k_{Φ} и k_e , которые рассматриваются далее как функции цели.

Распределение электромагнитного поля в системе «УД-ротор АД» носит существенно трехмерный характер и требует для своего анализа наличия трехмерной полевой модели. Такая модель разработана авторами и подробно описана в работе [6]. Численное решение модели осуществлялось методом конечных элементов с помощью вычислительного пакета COMSOL Multiphysics 3,5a. Среднее время решения одной задачи на ПК с параметрами: AMD Athlon™ 64 X2 Dual Core 4000 + 2,63 ГГц, 3,00 ГБ ОЗУ, Windows XP Professional SP3, Radeon X1300 256 Мб составляет 270 с.

Базовым геометрическим размером УД, определяющим его массогабаритные показатели, является длина стержня $L_{СТ}$, на который намотана обмотка возбуждения. При проектировании УД этот размер необходимо выбирать исходя из предполагаемой номенклатуры ремонтируемых или изготавливаемых роторов АД. Предварительный анализ показал, что для универсального УД, предназначенного для диагностики роторов серийных АД в диапазоне мощностей 2...200 кВт, оптимальная длина стержня лежит в диапазоне значений $0,02 \leq L_{СТ} \leq 0,2$ м.

Задача параметрической оптимизации УД формулируется следующим образом.

1. *Варьируемыми параметрами* УД являются его 5 геометрических размеров: h_j , $l_{П}$, $L_{СТ}$, $L_{И}$, $b_{ОК}$. При этом принимается $b_{П} = L_{И}$.

2. *Параметрические ограничения* (диапазоны изменения значений параметров): $0,02 \text{ м} < h_j < 0,15 \text{ м}$; $0,01 \text{ м} < l_{П} < 0,05 \text{ м}$; $0,02 \text{ м} < L_{СТ} < 0,2 \text{ м}$; $0,03 \text{ м} \leq b_{ОК} \leq L_{СТ}$; $0,2 L_{СТ} \leq L_{И} \leq 1,5$. Эти ограничения определяются реальными типоразмерами роторов АД, для которых пред-

назначено УД. Нижний предел h_j обусловлен возможностью размещения обмотки возбуждения УД. Верхний предел h_j задается исходя из предварительных расчетов, которые показывают чрезмерное увеличение потоков рассеивания при $h_j > 0,15$ м. Ограничения по l_{Π} обусловлены шириной стержня магнитопровода. Ограничения по параметру b_{OK} обусловлены: по нижнему пределу – возможностью размещения исследуемого ротора, по верхнему – осевым размером L_{CT} .

3. *Функциями цели* являются коэффициенты k_{Φ} и k_e (максимально возможные значения), которые изменяются в пределах $0 \leq k_{\Phi} \leq 1$ и $k_e \geq 1$. Из физических свойств следует, что эти функции цели, дополняя друг друга, не являются противоречивыми.

Для представления результатов оптимизации в обобщенной форме целесообразно выразить варьируемые параметры УД в системе относительных единиц. В качестве базовой единицы далее выбрано значение длины стержня $L_B = L_{CT} = 0,1$ м. При этом все параметры в относительных единицах обозначаются с верхним индексом «*», например, $h_j^* = h_j / L_B$.

Численные результаты расчетов поля и коэффициентов k_{Φ} , k_e зависят не только от параметров УД, но и от параметров ротора АД (геометрии зубцово-пазовой зоны, электропроводности материала стержней – медь или алюминий). Далее приводятся результаты оптимизации, полученные на примере ротора серийного АД мощностью 5,5 кВт типа 4А112М4У3. Вместе с тем, как показали дальнейшие исследования, найденные в результате такой оптимизации параметры УД в целом остаются оптимальными и для АД других мощностей и типоразмеров.

При выборе метода оптимизации необходимо учитывать достаточную трудоемкость решения одного варианта задачи с помощью трехмерной полевой модели. Это ограничивает количество выполняемых расчетов, необходимых для реализации алгоритма оптимизации. Поскольку целевые функции заданы не в аналитической форме, то поставленная задача решается методами многомерного поиска без вычисления производных. Наиболее подходящим методом является метод покоординатного спуска [7].

Алгоритм оптимизации следующий. На основе предварительных инженерных расчетов выбирается начальная точка $\{h_j^0, l_{\Pi}^0, L_{CT}^0, L_{И}^0, b_{OK}^0\}$ в пятимерном пространстве варьируемых параметров УД, которой соответствуют начальные значения целевых функций $k_{\Phi}^{(0)}$ и $k_e^{(0)}$. При фиксированных значениях параметров $l_{\Pi}^0, L_{CT}^0, L_{И}^0, b_{OK}^0$ решается задача одномерной оптимизации (методом перебора или поразрядного поиска) искомым целевым функциям при изменении только одного первого параметра h_j , в результате этого находится «улучшен-

ная» точка $\{h_j^1, l_{\Pi}^0, L_{CT}^0, L_{И}^0, b_{OK}^0\}$ в которой $k_{\Phi}^{(1)} > k_{\Phi}^{(0)}$ и $k_e^{(1)} > k_e^{(0)}$. Фиксируя далее совокупность параметров $h_j^1, L_{CT}^0, L_{И}^0, b_{OK}^0$ аналогично решается задача одномерной оптимизации при вариации второго параметра l_{Π} . В результате определяется следующая точка $\{h_j^1, l_{\Pi}^1, L_{CT}^0, L_{И}^0, b_{OK}^0\}$, в которой $k_{\Phi}^{(2)} > k_{\Phi}^{(1)}$ и $k_e^{(2)} > k_e^{(1)}$. Проводя таким же образом оптимизацию по остальным параметрам, находится «наилучшая» точка $\{h_j^1, l_{\Pi}^1, L_{CT}^1, L_{И}^1, b_{OK}^1\}$ с наибольшими значениями функций цели. В случае необходимости выполняется вторая итерация описанного алгоритма.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривался ротор серийного АД типа 4А112М4У3 (мощность – 5,5 кВт, частота вращения – 1440 об / мин, напряжение питания – 220 / 380 В). Ротор имеет следующие данные: диаметр ротора $D_2 = 125,4$ мм; высота паза ротора $h_{\Pi} = 13,6$ мм; ширина широкой части паза $b_1 = 6,1$ мм; ширина узкой части паза $b_2 = 3,3$ мм; ширина шлица $b_{\text{ш}} = 1$ мм; высота шлица $h_{\text{ш}} = 0,5$ мм; материал стержней – алюминий. Расчетные зависимости коэффициентов k_{Φ} и k_e от переменных $h_j^*, l_{\Pi}^*, L_{CT}^*, L_{И}^*, b_{OK}^*$ на каждом шаге оптимизации приведены на рис. 2.

В качестве исходного варианта УД был взят экспериментальный образец устройства, описанный авторами в работе [5]. Величина экспериментально найденного коэффициента чувствительности УД составила $k_e = 1,12$.

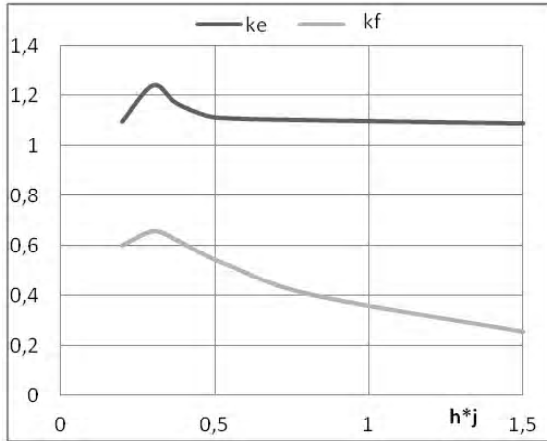
Анализ полученных зависимостей позволил установить следующие диапазоны значений оптимальных параметров УД, выраженных в относительных единицах.

1. Оптимальная длина ярма магнитопровода $h_j^* = 0,25 \dots 0,3$. Именно при таких значениях наблюдается максимум обеих функций цели. При больших значениях h_j^* увеличивается рассеяние потока по высоте ярма, а при малых значениях существенно возрастают потоки рассеивания, замыкающиеся через ротор АД в обход полюсов и ИО.

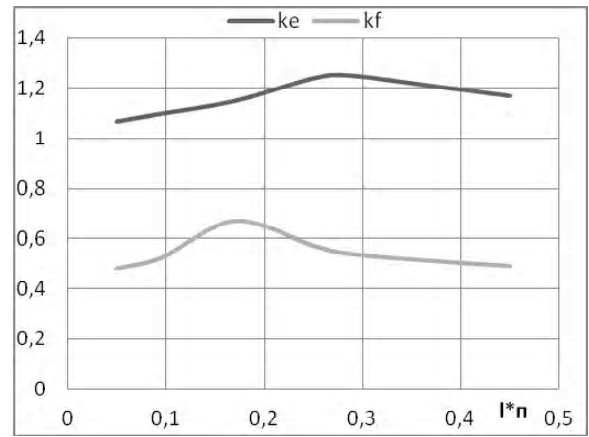
2. Оптимальная длина полюса находится в пределах $l_{\Pi} = 0,2 \dots 0,3$ (рис. 2, б).

3. Зависимости коэффициентов k_{Φ} , k_e от длины стержня носят монотонный характер. При более коротких стержнях потоки рассеивания уменьшаются, что увеличивает эти коэффициенты. Однако возможное уменьшение длины стержня ограничено как технологией изготовления обмотки возбуждения УД, так и требованиями по применению устройства для АД большей мощности.

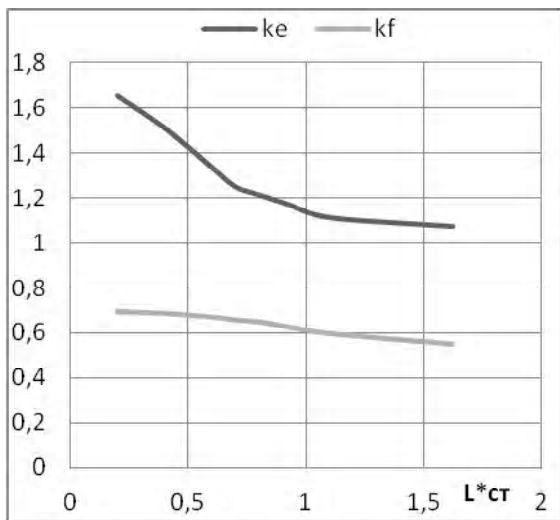
4. Оптимальная ширина ярма магнитопровода вдоль оси ротора лежит в пределах $L_{И}^* = 1,0 \dots 1,2$. При этом с увеличением $L_{И}^*$ коэффициент полезного потока k_{Φ} меняется слабо, поскольку при этом слабо меняется соотношение потоков рассеивания и взаимоиндукции.



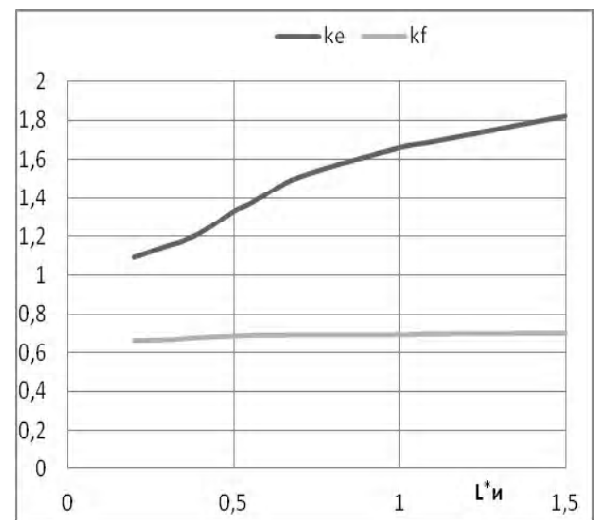
a)



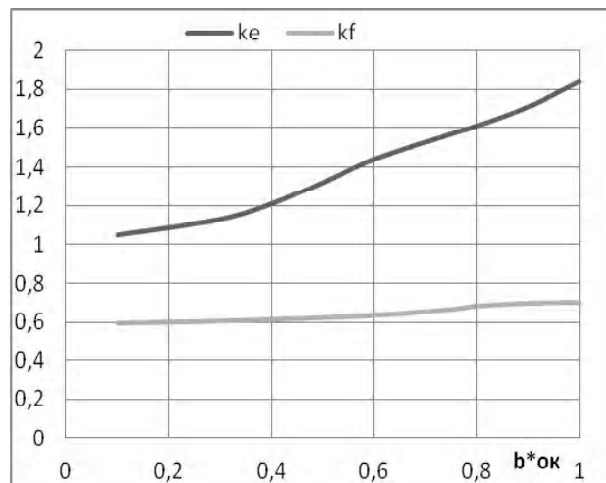
б)



в)



з)



д)

Рис. 2. Зависимости целевых функций от варьируемых параметров УД:

a - $k_{e \max} = 1,24$; $k_{\phi \max} = 0,656$, б - $k_{e \max} = 1,251$; $k_{\phi \max} = 0,672$, в - $k_{e \max} = 1,658$; $k_{\phi \max} = 0,694$, з - $k_{e \max} = 1,82$; $k_{\phi \max} = 0,701$, д - $k_{e \max} = 1,84$; $k_{\phi \max} = 0,703$

5. Оптимальное расстояние между полюсами УД находится в пределах $b_{OK}^* = 0,9 \dots 1,0$.

На коэффициент чувствительности УД существенное влияние оказывает не только геометрия УД, но и ряд других факторов, в частности – место расположения ИО. Размещение ИО на стержне нецелесообразно. Проведенные расчеты показали, что в этом случае изменение магнитного потока и ЭДС ИО при появлении в зоне контроля дефекта КЗОР весьма мало – меньше (2...4) %. На рис. 3 представлена зависимость коэффициента чувствительности от места расположения ИО по высоте ярма УД. Из рис. 3 следует целесообразность расположения ИО в непосредственной близости от полюсов магнитопровода.

На коэффициент чувствительности влияет также форма воздушного зазора между полюсами магнитопровода УД и диагностируемым ротором АД.

Рассмотрим влияние неравномерности воздушного зазора между измерительным полюсом и исследуемым ротором на показания коэффициента чувствительности. Неравномерность воздушного зазора определяется коэффициентом:

$$k_{\delta} = \delta_e / \delta_i,$$

где δ_e – величина воздушного зазора с внешней стороны; δ_i – величина воздушного зазора со стороны обмотки возбуждения (рис. 4). Оценка влияния неравномерности зазора на k_e проводилась вначале при варьировании ве-

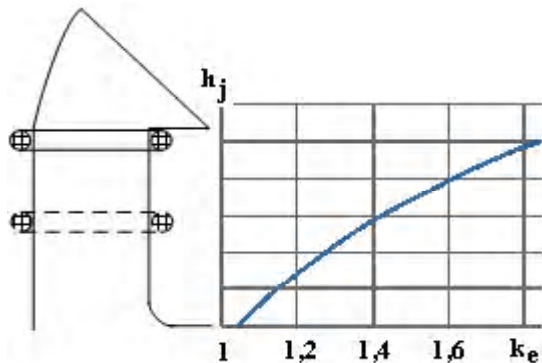


Рис. 3. Зависимость k_e от положения ИО по высоте ярма

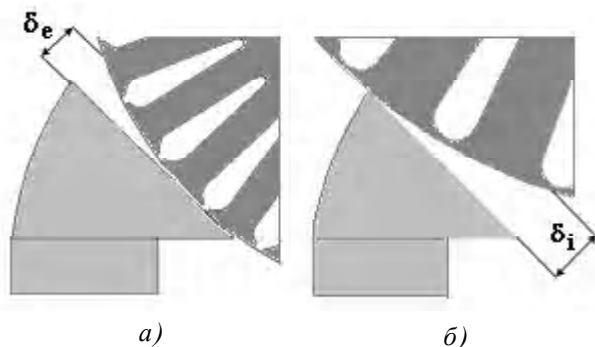


Рис. 4. Влияние неравномерности воздушного зазора на коэффициент чувствительности
а – внешний зазор, б – внутренний зазор

личины зазора δ_e при фиксированном δ_i (рис. 4, а), а потом наоборот (рис. 4, б).

Минимальное значение зазоров δ_e и δ_i принималось равным 0,5 мм, что достаточно для надежного поворота ротора при диагностике. При $\delta_e = \delta_i$ коэффициент $k_{\delta} = 1$ и УД имеет наибольшую чувствительность.

Зависимость k_e от неравномерности воздушного зазора представлена на рис. 5.

Кривая, обозначенная штриховыми линиями, соответствует средней величине воздушного зазора $\delta_{cp} = 2$ мм. Из рис. 5 следует вывод о необходимости поддержания минимально возможного зазора δ_i для получения максимальной чувствительности.

При этом необходимо обеспечить минимальную величину среднего зазора. Зазор δ_e по сравнению с δ_i меньше влияет на коэффициент чувствительности. Для обеспечения линейной зависимости сигнала ИО необходима ненасыщенная система УД. Как показывают расчеты, оптимальный диапазон индукции в стержне составляет 0,15...0,3 Тл. При дальнейшем увеличении индукции выходной сигнал ИО изменяется по нелинейному закону, при этом k_e снижается до 1,04...1,07. Снижение индукции ниже указанного уровня приводит к чрезмерному повышению массогабаритных показателей и удорожанию устройства. Это требование является основой для выбора количества витков и тока в обмотке возбуждения УД. Оптимизированное УД имеет существенно более высокие коэффициенты k_{ϕ} и k_e по сравнению с исходным УД [5] $k_e = 1,75$ ($k_e = 1,12$). В табл. 1 приведено сравнение данных исходного и оптимизированного УД при диагностировании одного поврежденного стержня в роторе АД. Здесь k_v – коэффициент соотношения масс исходного и оптимизированного УД.

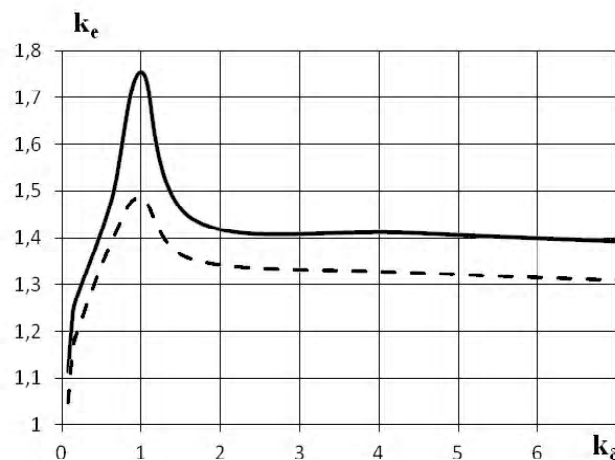


Рис. 5. Влияние неравномерности воздушного зазора на k_e

Таблиця 1.

	$L_{СТ}, м$	$h_j, м$	$L_{И}, м$	$k_ε$	$k_φ$	$k_γ$
УД [6]	0,103	0,042	0,045	1,12	0,532	2,27
Оптимізований УД	0,03	0,03	0,077	1,75	0,70	

ВЫВОДЫ

1. Оптимізація індукційного УД, виконана методом покоординатного спуску з допомогою трьохмерної полевої математическої моделі дозволила суттєво улічшити показателі УД. По порівнянню з існуючим експериментальним образцом в оптимізованому УД коефіцієнт корисного потоку збільшився в 1,22 рази, а коефіцієнт чутливості – в 1,56 раз.

2. На коефіцієнт чутливості суттєве впливає місце розташування ІО на ярмі. Показана цільовість розташування ІО в неперемітній близькості від полюсів УД.

3. Обоснована оптимальна величина індукції в стержні на рівні 0,15...0,3 Тл, яка забезпечує лінійну залежність сигналу ІО і визначає необхідну намагнічуючу силу обмотки збудження.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Таран, В. П.* Методические указания по диагностированию асинхронных короткозамкнутых электродвигателей / В. П. Таран, В. А. Евлантьев. – М. : ГОСНИТИ, 1981. – 44 с.
2. *Зайцев, А. И.* Установка для обнаружения литейных дефектов стержней ротора асинхронного двигателя

/ А. И. Зайцев, М. П. Табинский // Электротехника. – 1966. – № 3. – С. 56–58.

3. Авторське свідоцтво СРСР № 1182442 Спосіб контролю якості короткозамкненої обмотки ротора та пристрій для його здійснення МПК G 01 R 31 / 02, 1985
4. Авторське свідоцтво СРСР № 1396093 Пристрій для випробування короткозамкнених роторів асинхронних двигунів МПК G 01 R 31 / 02, 1988.
5. *Васьковский, Ю. Н.* Исследование устройства контроля короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя / Ю. Н. Васьковский, М. А. Коваленко // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – № 6. – С. 18–22.
6. *Васьковский, Ю. Н.* Трехмерная полевая математическая модель устройства диагностики короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей / Ю. Н. Васьковский, М. А. Коваленко // Праці ІЕД НАНУ. – 2012. – № 31. – С. 78–83.
7. *Сухарев, А. Г.* Курс методов оптимизации [Учеб. пособие] / Сухарев А. Г., Тимохов А. В., Федоров В. В. – [2-е изд.]. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 386 с.

*Стаття надійшла до редакції 12.10.2012.
Після доробки 24.10.2012.*

Ю. М. Васьковский, М. А. Коваленко

Дослідження та оптимізація пристрою для діагностики дефектів обмотки ротора короткозамкненого асинхронного електродвигуна

На основі тривимірної польової математическої моделі проведена параметрична оптимізація індукційного пристрою діагностики дефектів короткозамкненої обмотки ротора асинхронного двигуна

Ключові слова: короткозамкнена обмотка ротора, асинхронний двигун, пристрій діагностики дефектів, оптимізація параметрів.

J. N. Vaskovskiy, M. A. Kovalenko

Research and optimization of device for finding defects of rotor winding of short-circuit asynchronous motor

Based on a three-dimensional mathematical model, the parametric optimization of the diagnostic induction device for defects of rotor winding of short-circuit asynchronous motor is performed.

Key words: short-circuited rotor winding, asynchronous motor, device for defect diagnostics, parameter optimization.