

Торайғыров университетінің хабаршысы  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Вестник Торайғыров университета

---

# Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы  
1997 жылдан бастап шығады



## ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия  
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

---

№ 2 (2022)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**  
**Вестник Торайгыров университета**

**Энергетическая серия**  
выходит 4 раза в год

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания  
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

публикация материалов в области электроэнергетики,  
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и  
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

**Подписной индекс – 76136**

<https://doi.org/10.48081/ZOCF4313>

---

**Бас редакторы – главный редактор**

Кислов А. П.

*к.т.н., доцент*

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

**Редакция алқасы – Редакционная коллегия**

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*  
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*  
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*  
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*  
Новожилов Т. А., *к.т.н., доцент (Россия)*  
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*  
Нефтисов А. В., *доктор PhD, доцент*  
Шокубаева З. Ж. *технический редактор*

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университете

**\*А. О. Юсупова<sup>1</sup>, А. О. Потапенко<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

## **СПОСОБ И СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений в области диагностирования эксцентриситета ротора асинхронного двигателя считается то, в котором для измерения смещения ротора используют емкостные измерительные преобразователи. При этом наиболее простым в изготовлении и установке считается емкостной измерительный преобразователь, который выполнен в виде пазового клина с электродом в виде металлической фольги. В связи с этим в данной работе предложен метод моделирования зависимости емкости преобразователя такого типа при вращении ротора с открытыми пазами. Исследованы зависимости спектра этой емкости от отношения ширины преобразователя к ширине раскрытия паза статора и от отношения ширины раскрытия паза ротора к величине воздушного зазора. На основании этого разработаны рекомендации по выбору информационного признака повреждения, разработана блок-схема системы диагностики, а также рекомендации по определению параметров ее элементов. В электроэнергетике, например, при диагностировании электрических машин (ЭМ) из-за их простоты и надежности все большую популярность приобретают методы, в которых измерение перемещения элементов электрических машин осуществляется с помощью емкостных измерительных преобразователей (ИП).*

*Ключевые слова: Система диагностики, зубчатость ротора, воздушный зазор, эксцентриситет ротора, емкостные измерительные преобразователи, переменная составляющая емкости.*

### **Введение**

Как известно, изменение емкости этих преобразователей может происходить не только за счет перемещения контролируемого элемента машины, но и за счет вращения его на валу [1-4]. Примером [4] этого может

служить измерение эксцентриситета ротора в процессе эксплуатации, когда один из электродов ИП имеет постоянные геометрические размеры, а другой представлен поверхностью вращающегося зубчатого сердечника ротора как это показано на рисунке 1,а, 1 и 2 – сердечники статора и ротора; 3 – пазовый клин; 4 – электрод емкостного ИП; 5 – воздушный зазор ЭМ.

### Материалы и методы

В связи с тем, что емкость ИП в процессе вращения ротора меняется не только от величины эксцентриситета ротора, но и от следующих вдоль его электрода открытых пазов ротора разработка средств диагностирования эксцентриситета ротора ЭМ становится невозможной без моделирования величины емкости преобразователя в зависимости от этих факторов.

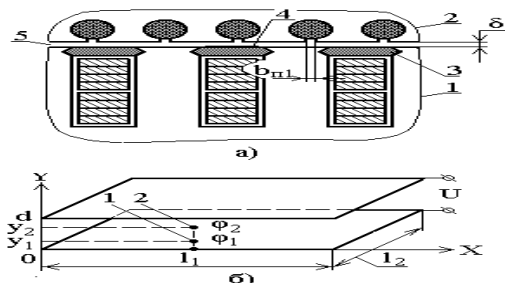


Рисунок 1 – Конструкционные особенности ЭМ и расчетная схема

Как известно [5-7], существует много способов определения емкости конденсатора с произвольной формой электродов. Однако, их анализ показал, что некоторые из них очень сложно реализовать даже при использовании средств вычислительной техники. В других рассмотрены только частные случаи поверхности электродов. А остальные не удовлетворяют требуемой точности. В связи с этим, электрическую емкость двух с электродов произвольной формы предлагается определять следующим образом.

В соответствии с [8] напряженность электростатического потенциального поля в любой точке между двумя электродами этого конденсатора является величиной постоянной. В связи с этим и рисунком 1

$$\vec{A} = \frac{U}{d} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{y_2 - y_1} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta y} \quad (1)$$

где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  - потенциалы электростатического поля в точках 1 и 2 относительно нижней пластины конденсатора;  $Y_1$  и  $Y_2$  координаты точек 1 и 2;  $U$  и  $d$  напряжение и расстояние между электродами конденсатора.

### Результаты и обсуждение

Тогда, с учетом соотношений уравнения (1) для определения емкости воздушного плоского конденсатора можно воспользоваться эмпирической зависимостью

$$C = \epsilon_0 l_1 l_2 \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{Y_2 - Y_1} = \epsilon_0 l_1 l_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta y}, \quad (2)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  - ширина и длина электродов конденсатора;  $\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная вакуума.

Так как электростатическое поле конденсатора является потенциальным и в нем отсутствуют свободные источники электрического поля, то для его описания с учетом схемы на рисунке 1 и [8,9] используется уравнение Лапласа

$$\partial^2 \Phi / \partial x^2 + \partial^2 \Phi / \partial y^2 = 0. \quad (3)$$

Из анализа [8-10] становится ясно, что получение аналитического выражения путем непосредственного решения уравнения (3) при сложной форме электродов представляется трудной, а иногда и неразрешимой задачей. В тоже время эту задачу достаточно просто решить с помощью метода сеток. В нем частные производные уравнения Пуассона (3) для  $i, -k$  го узла на рисунке 2 заменяются выражениями

$$\frac{\partial^2 \Phi_x}{\partial y^2} \approx \frac{\Phi_{x(i,k+1)} - 2\Phi_{x(i,k)} + \Phi_{x(i,k-1)}}{h^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_x}{\partial z^2} \approx \frac{\Phi_{x(i+1,k)} - 2\Phi_{x(i,k)} + \Phi_{x(i-1,k)}}{h^2} \quad (5)$$

В результате в  $i, -k$  - том узле потенциал электростатического поля определяется как

$$\Phi_{x(i,k)} = \frac{1}{4} (\Phi_{x(i+1,k)} + \Phi_{x(i-1,k)} + \Phi_{x(i,k+1)} + \Phi_{x(i,k-1)}) \quad (6)$$

Проверку адекватности такой математической модели для решения подобного рода задач проще всего осуществить на примере определения

емкости воздушного плоского конденсатора. Так в соответствии с [8] и рисунка 1,6 емкость плоского конденсатора

$$C = \varepsilon_0 l_1 l_2 / d. \quad (7)$$

При использовании метода сеток для моделирования электростатического поля между электродами МП исследуемая область с помощью  $k_m + 2$  горизонтальных и  $i_m + 2$  вертикальных линий как показано на рисунке 2 разбивается на квадратные клетки со стороной  $h$ . Пересекаясь  $K$  – ая горизонтальная линия с  $i$  – ой вертикальной линией образуют  $i, k$  – ий узел, где  $k_m$  и  $i_m$  – число узлов в исследуемой области по вертикали и горизонтали в которых осуществляется расчет потенциала электростатического поля по уравнению (6). На рисунке эти узлы находятся в области очерченной пунктирной линией. Ширина электродов  $l_1$  конденсатора и расстояние  $d$  между его электродами на расчетной схеме задаются как

$$l_1 = x_2 - x_1 \text{ и } d = y_2 - y_1, \quad (8)$$

где  $X_1, X_2$  и  $Y_1, Y_2$  – координаты расположения электродов конденсатора в клетках.

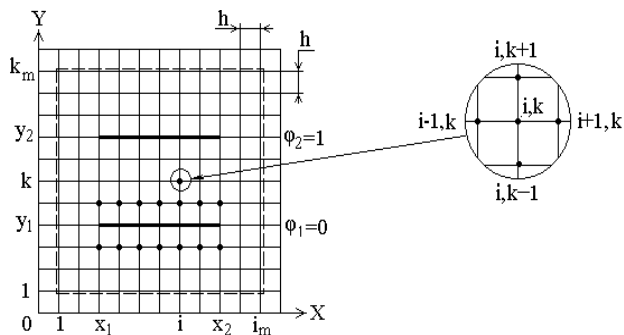


Рисунок 2 – Расчетная схема

При моделировании электростатического поля потенциал  $\Phi_2$  верхнего электрода принимается равным единице, а нижнего  $\Phi_1$  – нулю. Всем узлам с координатами  $k = 0$  и  $k = k_m + 1$  после каждой итерации присваиваются потенциалы узлов с  $k = 1$  и  $k = k_m$ , а всем узлам с координатой  $i = 0$  и

$i = i_m + 1$  после каждой итерации присваиваются потенциалы узлов с  $i = 1$  и  $i = i_m$ . Что для данной типа задачи это является граничными условиями.

Потенциалы каждого узла в очерченной зоне рассчитывают с помощью компьютера по методу итераций, который предусматривает расчет с потенциалов начиная с левого нижнего угла и затем обратно с правого верхнего угла этой зоны. После каждой итерации граничные условия выставляются вновь, а количество итераций выбирается таким, чтобы достичь наименьших погрешностей.

После расчета потенциалов в узлах емкость конденсатора рассчитывается с учетом математического выражения (2) как

$$C = \epsilon_0 l_1 l_2 \frac{\sum_{n=1}^N \varphi_n / N - \varphi_1}{h} = \epsilon_0 l_1 l_2 \frac{\sum_{n=1}^N \varphi_n}{N h}, \tag{9}$$

$\varphi_n$  – потенциалы всех узлов прилегающих к электроду  $\varphi_1 = 0$ ;  $N$  – число узлов прилегающих к электроду ИП с  $\varphi_1 = 0$ . На рисунке 2 все узлы, которые прилегают к электроду с потенциалом  $\varphi_1 = 0$ , помечены точками.

Если для расчетной схемы на рисунке 2 принять  $h = 0.01\text{м}$ ,  $k_m = 11$  клеток, а координаты  $x_1 = 3$ ,  $x_2 = 9$  и  $y_1 = 4$ ,  $y_2 = 8$ , то результаты моделирования потенциалов в узлах можно представить в виде таблицы, приведенной на рисунке 3.

	0.00	0.76	0.77	0.78	0.80	0.80	0.80	0.80	0.78	0.77	0.75	0.74	0.00	
$k_m$	0.76	0.76	0.77	0.78	0.80	0.80	0.80	0.80	0.78	0.77	0.75	0.74	0.74	
	0.75	0.75	0.77	0.79	0.80	0.81	0.81	0.80	0.79	0.77	0.74	0.73	0.73	
	0.73	0.73	0.76	0.79	0.81	0.82	0.83	0.82	0.80	0.76	0.73	0.71	0.71	
	0.67	0.67	0.69	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.67	0.67	$\varphi=1$
	0.58	0.58	0.60	0.62	0.66	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.63	0.61	0.61	
	0.49	0.49	0.48	0.48	0.49	0.50	0.50	0.50	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	
	0.39	0.39	0.36	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.34	0.38	0.40	0.41	0.41	
	0.33	0.33	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.33	0.33	$\varphi=0$
	0.29	0.29	0.27	0.23	0.19	0.18	0.17	0.18	0.19	0.21	0.24	0.27	0.27	
	0.26	0.26	0.25	0.23	0.21	0.19	0.19	0.19	0.20	0.21	0.23	0.25	0.25	
1	0.25	0.25	0.24	0.23	0.21	0.20	0.19	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.24	
	0.00	0.25	0.24	0.23	0.21	0.20	0.19	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.00	
		1												$i_m$

Рисунок 3 – Результаты моделирования потенциалов в узлах электростатического поля двух плоских электродов

При этом величина емкости ИП рассчитанной по математическому выражению (9) и с использованием метода сеток равнялась 1,55пФ и 1,442пФ соответственно. При этом погрешность расчета по методу сеток составила 7,001%. Таким образом, такой подход к определению емкости воздушного ИП прост и обладает достаточной для реализации систем диагностики точностью.

Используя предложенную модель можно достаточно просто оценить колебание емкости ИП при вращении ротора асинхронного двигателя (АД) с открытыми пазами. Если принять ширину ИП  $l_1$ , величину воздушного зазора  $g$  и ширину раскрытия паза ротора  $b_{п1}$  равными 5, 3 и 3 клеток, то результаты моделирования потенциалов в узлах при расположении электрода ИП над раскрытием паза ротора можно представить в виде таблицы, приведенной на рисунке 4. При этом величина емкости ИП равнялась 2,628 пф. В тоже время при расположении электрода ИП над серединой зубца ротора эта емкость равнялась 2,736пф, как показано на рисунке 5.

		$\varphi=0$				$\varphi=1$				$\varphi=0$			
$k_m$	0.00	0.00	0.00	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	0.42	0.00	0.00	0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	0.42	0.00	0.00	0.00	
	0.12	0.12	0.19	0.32	0.50	0.61	0.64	0.61	0.53	0.38	0.21	0.12	
	0.13	0.13	0.17	0.25	0.35	0.42	0.44	0.42	0.36	0.27	0.19	0.14	
	0.09	0.09	0.11	0.16	0.22	0.27	0.29	0.27	0.22	0.17	0.13	0.10	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.18	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.10	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
	1	$\varphi=0$						$\varphi=0$	1	$i_m$			

Рисунок 4 – Результаты моделирования потенциалов в узлах электростатического поля плоского электрода и зоны воздушного зазора над раскрытием паза АД

		$\varphi=1$				$\varphi=0$				$\varphi=1$			
$k_m$	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	
	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	
	0.62	0.62	0.58	0.48	0.30	0.16	0.13	0.15	0.25	0.44	0.59	0.65	
	0.41	0.41	0.38	0.32	0.24	0.17	0.14	0.16	0.21	0.38	0.38	0.42	
	0.23	0.23	0.22	0.19	0.16	0.13	0.12	0.12	0.14	0.18	0.22	0.24	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	1	$\varphi=0$						$\varphi=0$	1	$i_m$			

Рисунок 5 – Результаты моделирования потенциалов в узлах электростатического поля плоского электрода и зоны воздушного зазора над серединой зубца ротора АД

Таким образом, емкость ИП при вращении ротора АД можно представить в виде



$$C_{\text{ИП}} = C_{\text{ИП.0}} + C_{\text{ИП.м}} \sin(2\pi f_2 t), \quad (10)$$

где  $C_{\text{ИП.0}}$  и  $C_{\text{ИП.м}}$  – постоянная составляющая и амплитуда переменной составляющей емкости ИП;  $f_2 = nZ_2 / 60$  – частота колебаний переменной составляющей емкости ИП;  $n$  – число оборотов ротора в минуту;  $t$  – время.

По результатам определения сеток на рисунке 4 величины емкостей  $C_{\text{ИП.0}} = 2,682 \text{ пф}$  и  $C_{\text{ИП.м}} = 0,054 \text{ пф}$ .

Из приведенного примера становится ясно, что предложенный метод позволяет просто и приемлемой точностью моделировать емкость ИП, например, для системы диагностики эксцентриситета ротора, причем независимо от формы электродов.

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений в области диагностирования эксцентриситета ротора асинхронного двигателя (АД) считается то, в котором для измерения смещения ротора используют емкостные измерительные преобразователи (ИП) [1]. В тоже время анализ конструктивных возможностей емкостных ИП [2] показывает, что наиболее простым в изготовлении и установке является емкостной ИП в виде пазового клина с электродом из металлической фольги [2,3].

Однако, емкость такого ИП при роторе с открытыми пазами АД не постоянна и зависит не только от смещения ротора, но и от его вращения. Поэтому при реализации системы диагностики эксцентриситета ротора непонятно, что использовать в качестве информационного признака повреждения и каким образом строить систему диагностики. В данной работе данную проблему предлагается решать следующим образом.

Конструкция емкостного ИП с электродом на пазовом клине статора АД [2,3] приведена на рисунке 6, где 1 и 2 сердечники статора и ротора, 3 – пазовый клин из текстолита с наклеенной на него металлической фольгой 4.

При установке в АД такой ИП просто забиваются в головку пазов статора с торца сердечника, а смещение ротора определяется по величине емкости между поверхностью ферромагнитного сердечника ротора 2 и металлической фольгой 4 [1,2].

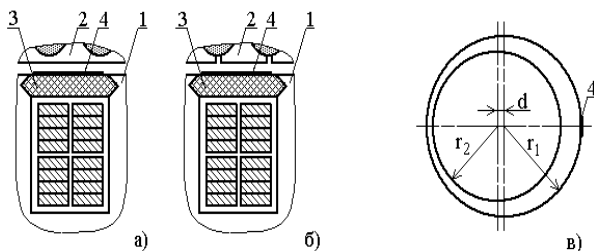


Рисунок 6 – Емкостной ИП на пазовом клине и расположение ротора

1 и 2 сердечники статора и ротора, 3 – пазовый клин из текстолита с наклеенной на него металлической фольгой 4

Как известно [3,4], ротор АД может выполняться с открытыми и закрытыми пазами. Если ротор имеет закрытые пазы, то с учетом рисунка 1,а емкость такого ИП при вращении ротора относительно его поверхности не меняется и зависит только от смещения  $d$  ротора. Ее величину можно определить как

$$C_{\text{ип}} = \varepsilon \varepsilon_0 h_{\text{ип}} l_{\text{ип}} / (\delta_{\text{н}} - d), \quad (11)$$

где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная диэлектрика и вакуума;  $l_{\text{ип}}$  и  $h_{\text{ип}}$  – длина и ширина электрода;  $\delta = (r_1 - r_2)$  – номинальная величина воздушного зазора;  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы расточек статора и ротора.

Если у ротора пазы открытые [4,5], то с учетом рисунка 1,б емкость такого ИП при вращении ротора зависит не только от величины эксцентриситета ротора, но и от расположения раскрытый паза ротора относительно плоскости ИП. Это вызвано увеличением расстояния между электродом ИП и поверхностью сердечника ротора при прохождении открытия паза вдоль этого электрода. При этом частота изменения емкости ИП

$$f_2 = n_2 z_2 = \frac{z_2 f_c}{P} (1 - s_2), \quad (12)$$

где  $n_2$  – число оборотов ротора в секунду;  $z_2$  – число зубцов на роторе;  $f_c$  – частота тока в сети;  $S_2$  скольжение ротора;  $P$  число пар полюсов АД.

Определение зависимости  $C_{\text{ин}}$  от положения раскрытий пазов ротора показанного на рисунках 2,а и 2,б по методике изложенной в [6,7] достаточно сложно. Его можно упростить, если допустить, что силовые линии электростатического поля от электрода ИП перпендикулярны поверхности ротора, а глубина раскрытий паза равна их ширине. Это допущение не приводит к существенным погрешностям при моделировании  $C_{\text{ин}}$ , так как в соответствии с таблицей 1 воздушный зазор значительно меньше раскрытия паза ротора  $b_{z2}$ . В этом случае при расположении раскрытия паза ротора относительно электрода емкостного ИП в соответствии с рисунком 7,а емкость ИП определяется по математическому выражению (1).

В тоже время при расположении раскрытия паза ротора относительно электрода ИП в соответствии с рисунком 7,б емкость ИП определяется как

$$C_{\text{инп}} = C_1 + C_2 + C_3, \quad (13)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  – емкости зон электрода ИП.

Таблица 1 – Размеры элементов зубцовой зоны АД и электрода ИП

Наименование параметра	Размеры в мм	
	АО-31-4	АО-114-6
Номинальный воздушный зазор $g_n$ , мм	0,3	1,3
Число пазов статора $z_1$	36	72
Число пазов ротора $z_2$	26	84
Зубцовое деление статора $t_{z1}$ , мм	9,78	21,7
Зубцовое деление ротора $t_{z2}$ , мм	13,5	18,62
Открытие паза ротора $b_{z2}$ , мм	2	3

Емкость первой и третьей зоны электрода ИП в этом случае определяются как

$$C_1 = \varepsilon \varepsilon_0 h_1 / (\delta_n - d) \quad \text{и} \quad C_3 = \varepsilon \varepsilon_0 h_3 / (\delta_n - d), \quad (4)$$

где  $h_1$  и  $h_3$  - ширина первой и третьей зон электрода ИП. Емкость второй зоны электрода ИП определяется как

$$C_2 = \varepsilon \varepsilon_0 h_2 / (\delta_n - d + b_{z2}). \quad (5)$$

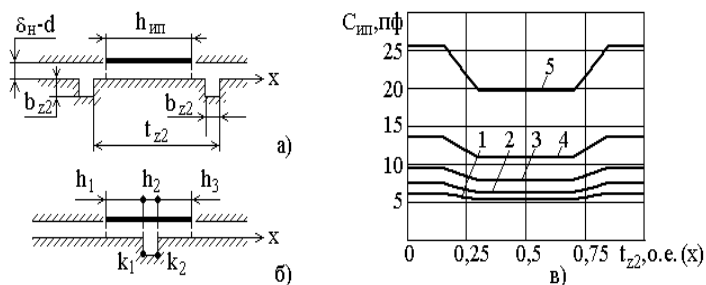


Рисунок 7 – Расчетные схемы и результат зависимости  $C_{\text{ИП}} = f(x)$

Результаты моделирования зависимости величины емкости ИП определяемой по приведенным математическим выражениям при повороте

вала ротора АД АО-114-6 на одно зубцовое деление ротора  $t_{z2}$  и при смещении его на 0; 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8 от номинальной величины воздушного зазора  $\delta_n$  в виде линий 1– 4 приведены рисунке 7,в. Из этого рисунка видно, что увеличение эксцентриситета ротора сопровождается ростом как постоянной, так переменной составляющей емкости  $C_{\text{ИП}}$  ИП. Однако характер их изменения в зависимости от смещения ротора неясен. Выяснить это, а, следовательно, осуществить выбор информационного признака повреждения, можно с помощью спектрального анализ зависимостей  $C_{\text{ИП}} = f(x)$ .

Для этого используется метод разложения в ряд Фурье [8–10], а емкость ИП представляют в виде

$$C_{\text{ИП}}(x) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(kf_2 + \psi_k), \quad (6)$$

где  $C_0$  - постоянная составляющая емкости ИП;  $C_k$  - емкость  $k$  - го члена ряда;  $\psi_k$  - угол сдвига по фазе  $k$  - го члена ряда.

### Выводы

1 В АД, ротор которого имеет закрытые пазы, емкость ИП зависит только от смещения ротора, что и является для системы диагностики этого типа АД информационным признаком повреждения.

2 В АД с ротором, который имеет открытые пазы, емкость ИП имеет как постоянную, так и переменную составляющие, при этом величина переменной составляющей в основном определена коэффициентом  $k_z$ , который является отношением ширины раскрытия паза ротора к величине воздушного зазора.

3 В АД, который имеет ротор с открытыми пазами, в качестве информационного признака смещения ротора следует использовать переменную составляющую емкости ИП, так как это позволяет отстроиться от погрешностей диагностики, вызванной влиянием соединительных проводников ИП.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Иванов-Смоленский, А. В.** Электрические машины. – М. : Энергия, 1980. – 909с.

2 **Новожилов, А. Н., Юсупова, А. О., Потапенко, А. О.** Метод моделирование электрической емкости измерительного преобразователя. Журнал «Вестник Машиностроения», №9, 2021, г. Москва.

3 **Novozhilov, A., Potapenko, A., Novozhilov, T.** Simulation of voltage on the stator winding terminals of induction motor with impaired short-circuit winding of rotor, «Applied Mechanics and Materials» Vol. 792 – 2015г. – 5 с.

4 **Novozhilov, A., Potapenko, A., Novozhilov, T.** Process Simulation in Induction Motor where Short-Circuit Rotor Bar is Failed during Run-down Regime Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033–2097, R. 94 NR 6/2018

5 **Новожилов, А. Н., Юсупова, А. О., Новожилов, Т. А.** Выбор метода выявления эксцентриситета ротора электрической машины / Вестник ПГУ. № 4. Серия Энергетическая – Павлодар, 2016, с. 117 – 126.

6 **Новожилов, А. Н., Юсупова, А. О., Новожилов, Т. А.** Выбор типа емкостного измерительного преобразователя для диагностики эксцентриситета ротора электрической машины / Материалы международной конференции «17 Сатпаевские чтения», том 19, с. 133–138.

7 **Novozhilov, A., Yussupova, A., Assainov, G., Novozhilov, T., Manukovsky, A.** Sources of independent power supply for protection relay/ Przegląd Elektrotechniczny, № 5, 2018, PP. 23–26.

8 **Novozhilov, A., Yussupova, A., Novozhilov, T, A.** A Device for Determining the Rotor Eccentricity of Rotating Electric Machines. Russian Electrical Engineering, № 2, P. 32–35

9 **Novozhilov, A., Yussupova, A., Novozhilov, T, A.** Determining the Displacement of the Rotor Shaft in an Electrical Machine. Russian Engineering Research, 2019, No. 10, pp. 827–830. Allerton Press, Inc., 2019.

10 **HuT, H. L., XuS, M., Hui, E.** A high-accuracy, high-speed interface circuit for differential-capacitance transducer. / [Sensors and Actuators A Physical. Volume 125, Issue 2](#), 10 January 2006, P.329–334.

## REFERENCES

1 **Ivanov-Smolensky, A. V.** Electriccheskie mashini. [Electric machines.] [Text]/ Ivanov-Smolensky A.V. – M.: Energiya, 1980 – 909s.

2 **Novozhilov, A. N., Yusupova, A. O., Potapenko, A. O.** Metod modelirovaniya electricheskoi emkosti izmeritelnogo preobrazovatelya. [Method of modeling the electrical capacitance of a measuring converter] [Text]/ The journal «Bulletin of Mechanical Engineering», Novozhilov A.N., Yusupova A.O., Potapenko A.O. No. 9, 2021, Moscow.

3 **Novozhilov, A., Potapenko, A., Novozhilov, T.** [Simulation of voltage on the stator winding terminals of induction motor with imposed short-circuit winding of rotor] [Text]/ “Applied Mechanics and Materials”. Novozhilov, A., Potapenko A., Novozhilov. Vol. 792 – 2015 – 5 p.

4 **Novozhilov, A., Potapenko, A., Novozhilov, T.** [Process Simulation in Induction Motor where Short-Circuit Rotor Bar is Failed during Run-down Regime] [Text]/ Przegląd elektrotechniczny. Novozhilov, A., Potapenko A., Novozhilov. ISSN 0033-2097, R. 94 NR 6/2018.

5 **Novozhilov, A. N., Yusupova, A. O., Novozhilov, T. A.** Vibor metoda viyavleniya exentrisiteta rotora electricheskoi mashini. [The choice of a method for detecting the eccentricity of the rotor of an electric machine] [Text]/ Bulletin of PSU. No. 4. A.N. Novozhilov, A.O. Yusupova, T.A. Novozhilov. Energy Series – Pavlodar, 2016, PP. 117 – 126.

6 **Novozhilov, A. N., Yusupova, A. O., Novozhilov, T. A.** Vibor tipa emkostnogo izmeritelnogo preobrazovatelya dlya diagnostiki exentrisiteta rotora electricheskoi mashini. [Selection of the type of capacitive measuring transducer for the diagnosis of the eccentricity of the rotor of an electric machine] [Text]/ Materials of the international conversion «A.N. Novozhilov, A.O. Yusupova, T.A. Novozhilov. 17 Satpayev readings», volume 19, PP. 133–138.

7 **Novozhilov, A., Yussupova, A., Assainov, G., Novozhilov, T., Manukovsky, A.** [Sources of independent power supply for protection relay] [Text]/ Przegląd Elektrotechniczny, Novozhilov, A., Yussupova A., Assainov, G., Novozhilov, T., Manukovsky, A. № 5, 2018, pp. 23–26.

8 **Novozhilov, A., Yussupova, A., Novozhilov, T. A.** [A Device for Determining the Rotor Eccentricity of Rotating Electric Machines]. [Text]/ Russian Electrical Engineering, Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T. A., № 2, P. 32–35

9 **Novozhilov, A., Yussupova, A., Novozhilov, T. A.** [Determining the Displacement of the Rotor Shaft in an Electrical Machine]. [Text]/ Russian Engineering Research, 2019, No. 10, pp. 827–830. Novozhilov A., Yussupova A., Novozhilov T.A. Allerton Press, Inc., 2019.

10 HuT, H. L., XuS, M., Hui, E. [A high-accuracy, high-speed interface circuit for differential-capacitance transducer]. [Text]/ [Sensors and Actuators A: Physical](#). H.L.HuT, M.XuS, E.Hui. [Volume 125, Issue 2](#), 10 January 2006, P. 329–334.

Материал поступил в редакцию 13.06.22.

\*Ә. О. Юсупова<sup>1</sup>, А. О. Потапенко<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

Материал баспаға 13.06.22 түсті.

## АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШ РОТОРЫНЫҢ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТІН ДИАГНОСТИКАЛАУ ӘДІСІ МЕН ЖҮЙЕСІ

*Қазіргі уақытта асинхронды қозғалтқыш роторының эксцентріктілігін диагностикалау саласындағы ең перспективалы бағыттардың бірі-ротордың ығысуын өлшеу үшін сыйымды өлшеу түрлендіргіштері қолданылады. Сонымен қатар, металл фольга түрінде электродпен ойық сына түрінде жасалған сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіші өндіріс пен орнатудың ең оңай түрі болып саналады. Осыған байланысты, бұл жұмыста ротор ашық ойықтармен айналған кезде түрлендіргіштің сыйымдылығының осы түрге тәуелділігін модельдеу әдісі ұсынылады. Осы сыйымдылық спектрінің түрлендіргіштің енінің статор ойығының ашылу еніне қатынасына және ротор ойығының ашылу енінің ауа саңылауының шамасына қатынасына тәуелділігі зерттелді. Осыған сүйене отырып, зақымданудың ақпараттық белгісін таңдау бойынша ұсыныстар жасалды, диагностикалық жүйенің блок-схемасы жасалды, сонымен қатар оның элементтерінің параметрлерін анықтау бойынша ұсыныстар жасалды. Электр энергетикасында, мысалы, электр машиналарын (ЭМ) диагностикалау кезінде олардың қарапайымдылығы мен сенімділігіне байланысты электр машиналары элементтерінің қозғалысын өлшеу сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіштерінің (IP) көмегімен жүзеге асырылатын әдістер танымал бола бастады.*

*Кілтті сөздер: диагностикалық жүйе, ротордың берілісі, ауа саңылауы, ротордың эксцентріктілігі, сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіштері, сыйымдылықтың ауыспалы компоненті.*

\*. Yussupova<sup>1</sup> A. O. Potapenko<sup>2</sup> A. O

<sup>1,2</sup>Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Material received on 13.06.22

## **METHOD AND SYSTEM FOR DIAGNOSING THE ECCENTRICITY OF THE ROTOR OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR**

*Currently, one of the most promising areas in the field of diagnosing the eccentricity of the rotor of an asynchronous motor is considered to be one in which capacitive measuring transducers are used to measure the displacement of the rotor. At the same time, the simplest in manufacturing and installation is considered to be a capacitive measuring transducer, which is made in the form of a groove wedge with an electrode in the form of a metal foil. In this regard, this paper proposes a method for modeling the dependence of the capacitance of a converter of this type when rotating a rotor with open slots. The dependences of the spectrum of this capacitance on the ratio of the width of the converter to the width of the opening of the stator groove and on the ratio of the width of the opening of the rotor groove to the size of the air gap are investigated. Based on this, recommendations have been developed for the selection of an information sign of damage, a block diagram of the diagnostic system has been developed, as well as recommendations for determining the parameters of its elements. In the electric power industry, for example, when diagnosing electric machines (EM), due to their simplicity and reliability, methods in which the movement of elements of electric machines is measured using capacitive measuring transducers (SP) are becoming increasingly popular.*

*Keywords: Diagnostic system, rotor gear, air gap, rotor eccentricity, capacitive measuring transducers, variable capacity component.*



Теруге 13.06.2022 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2022 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

16,6 Мб RAM

Шартты баспа табағы 23.88. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3958

Сдано в набор 13.06.2022 г. Подписано в печать 30.06.2022 г.

Электронное издание

16,6 Мб RAM

Усл. печ. л. 23.71. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 3958

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

[www.vestnik-energy.tou.edu.kz](http://www.vestnik-energy.tou.edu.kz)