

Система диагностики эксцентриситета ротора асинхронного двигателя с емкостным измерительным преобразователем

¹*ЮСУПОВА Асель Оразовна, PhD, ассоциированный профессор, aselasp@mail.ru,

¹ПОТАПЕНКО Александра Олеговна, PhD, ассоциированный профессор, alxopt@gmail.com,

¹Торайгыров университет, Казахстан, Павлодар, ул. Ломова, 64,

*автор-корреспондент.

Аннотация. 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 емкостный 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.

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

Введение

В электроэнергетике для производства электроэнергии и в качестве привода используют вращающиеся электрические машины [1]. У мощных электрических машин со сварным корпусом в качестве опоры для подшипников ротора используют специальные стояки, которые в свою очередь с помощью болтов прикрепляются к нижней несущей половине торцевого щита или к специальным выносным опорам, устанавливаемым на раме электрической машины или специальных фундаментах. В связи с этим одним из наиболее часто встречающихся повреждений в таких машинах является статический эксцентриситет ротора [1-2], который возникает из-за смещения этих стояков в процессе эксплуатации. Как известно, смещение ротора сопровождается неравномерностью воздушного зазора, возникновением в воздушном зазоре дополнительных магнитных полей и, как следствие, ухудшением электромеханических характеристик и коэффициента полезного действия [3, 4].

При значительном смещении сердечник ротора зацепляет за сердечник статора, что сопровождается их разогревом. Сильный разогрев сердечника статора и ротора приводит к ускоренному

разрушению изоляции их обмоток и возникновению в них коротких замыканий [5]. Таким образом, своевременное выявление наличия и величины смещения вала ротора позволит не только сократить потери электроэнергии, но и предотвратить повреждение вращающейся электрической машины.

Анализ известных методов выявления эксцентриситета ротора на выведенной из работы ЭМ или в процессе ее эксплуатации показывает, что наиболее перспективным является метод, в котором для получения информации о повреждении используются емкостные ИП [6]. В связи с этим результаты диагностирования ЭМ не зависят от колебаний параметров питающей сети, бросков нагрузки и изменений параметров ЭМ и ее режима работы.

Емкость ИП используемого в системе диагностики эксцентриситета ротора в процессе эксплуатации ЭМ зависит не только от эксцентриситета ротора, но и от формы поверхности сердечника ротора. Поэтому известные методы моделирования емкости не позволяют моделировать параметры такого ИП в процессе вращения ротора.

Как видно из [6-10], наибольший интерес при построении систем диагностики эксцентриситета

ротора ЭМ представляют конструкции емкостных ИП. При этом одним из основных электрических параметров таких преобразователей является емкость и ее зависимость от размеров и конфигурации воздушного зазора при эксцентриситете ротора.

У емкостного ИП, используемого в ЭМ [2], один из электродов размещается в корпусе емкостных преобразователей из диэлектрического материала и имеет постоянные геометрические размеры. Другим электродом является гладкий вал ротора ЭМ. Таким образом, для моделирования зависимости величины емкости ИП от расстояния между электродами можно воспользоваться расчетной схемой, приведенной на рисунке 1. Эта схема получается, если поверхность электродов развернуть вдоль воздушного зазора в плоскость.

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 то же время анализ конструктивных возможностей емкостных ИП [2] показывает, что наиболее простым в изготовлении и установке является емкостный ИП в виде пазового клина с электродом из металлической фольги [2, 3].

Однако емкость такого ИП при роторе с открытыми пазами АД короткозамкнутого ротора 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.

Основная часть

Конструкция емкостного ИП с электродом на пазовом клине статора АМ [2, 3] приведена на рисунке 1, 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 [12].

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

$$C_{\text{ип}} = \frac{\epsilon \epsilon_0 h_{\text{ип}} l_{\text{ип}}}{\delta_n - d}, \quad (1)$$

где ϵ и ϵ_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.

У емкостного ИП, как правило, один электрод неподвижен [2]. Он размещается на пазовом клине и имеет постоянные геометрические размеры. Другим электродом служит перемещающаяся при вращении ротора поверхность гладкого или зубчатого сердечника ротора. Если поверхность гладкая, то емкость ИП и ее зависимость определяются по математическому выражению (1) и

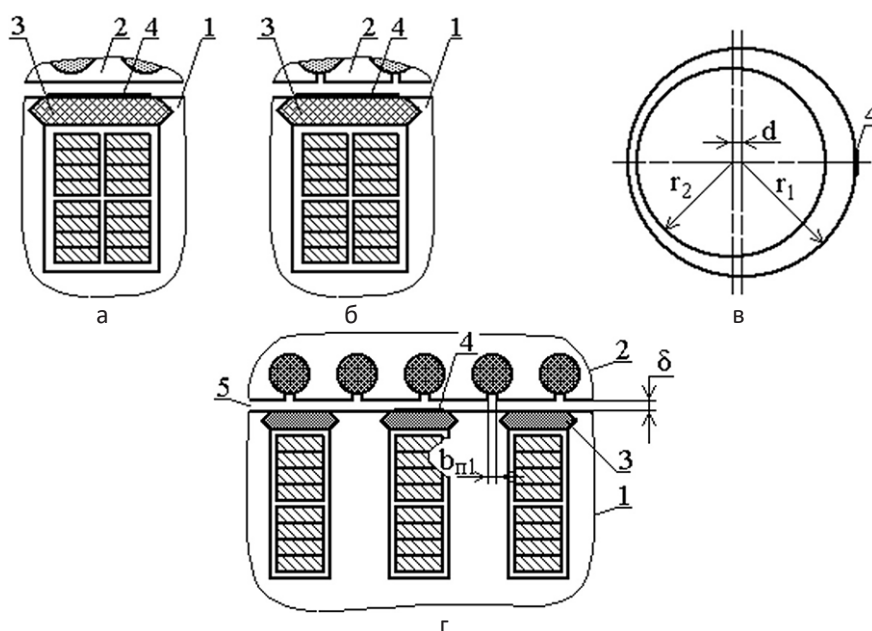


Рисунок 1 – Емкостный ИП на пазовом клине и расположение ротора

рисунку 1. Если же поверхность ротора зубчатая как это показано на рисунке 1,г, то емкость ИП в процессе вращения ротора будет меняться по величине.

Таким образом, для разработки средств диагностирования эксцентриситета ротора ЭМ требуется метод построения зависимости емкости ИП не только от расстояния между электродами, но от формы этих электродов.

Как известно [10-12], между электродами ИП при наличии напряжения на них создается электростатическое поле, параметры которого и определяют емкость преобразователя. Конфигурация этого поля определена размерами и формой электродов. Таким образом, именно электростатическое поле определяет величину емкости этих электродов. В соответствии с [10], прямой расчет электростатического поля и емкости возможен только у ИП с некоторыми простыми формами электродов. Например, для плоского или цилиндрического конденсатора удалось получить простое аналитическое выражение [12]. В то же время получение аналитического выражения емкости с иной формой электрода является сложной, а порой просто не возможной задачей. В этом случае следует пользоваться методами и математическими выражениями, приведенными в [13], или определять емкость классически, используя для этого параметры электростатического поля [12]. При этом осуществить моделирование электростатического поля можно экспериментальным путем или с помощью математической модели

[11-12].

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 раскрытий 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

$$f_2 = n_2 z_2 = \frac{z_2 f_c}{p} (1 - s_2), \quad (2)$$

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 $C_{\text{ИП}}$ 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 $C_{\text{ИП}}$, так как в соответствии с таблицей воздушный зазор δ_n значительно меньше раскрытия паза ротора b_{z2} . В этом случае при расположении раскрытия паза ротора относительно электрода емкостного ИП в соответствии с рисунком 2,а емкость ИП определяется по математическому выражению (1).

Размеры элементов зубцовой зоны АД и электрода ИП

Наименование параметра	Размеры в мм	
	АО-31-4	АО-114-6
Номинальный воздушный зазор δ_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

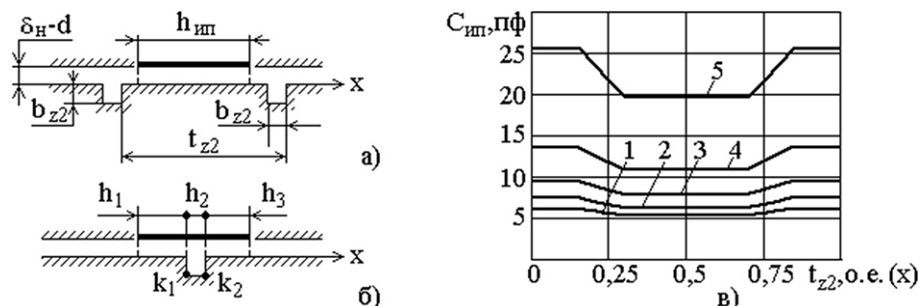


Рисунок 2 – Расчетные схемы и результат зависимости $C_{\text{ИП}} = f(x)$

В то же время при расположении раскрытия паза ротора относительно электрода ИП в соответствии с рисунком 2,б емкость ИП определяется как

$$C_{\text{ип}} = C_1 + C_2 + C_3, \quad (3)$$

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

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

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

где h_1 и h_3 – ширина первой и третьей зон электрода ИП.

Емкость второй зоны электрода ИП определяется как

$$C_2 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 h_2}{\delta_n - d + b_2}. \quad (5)$$

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 δ_n в виде линий 1-4, приведены на рисунке 2,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 анализа зависимостей $C_{\text{ип}} = f(x)$. Для этого используется метод разложения в ряд Фурье [8], 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; ψ_k – угол сдвига по фазе k -го члена ряда.

Анализ математических выражений (1), (4) и (5) показывает, что величина членов ряда емкости ИП зависит от отношения ширины ИП к раскрытию паза статора и ширины раскрытия паза ротора к величине воздушного зазора. Далее эти отношения будут представляться коэффициентами k_z и k_h . На рисунке 3,а приведены зависимости величин членов ряда емкости ИП от величины смещения ротора в относительных единицах. Они получены для АД АО-114-6, у которого k_z и k_h приняты равными 1,875 и 0,8. Анализ этих зависимостей показывает, что нулевой член ряда значительно превосходит остальные члены ряда. В связи с этим в качестве информационного признака повреждения имеет смысл использовать только C_0 , C_1 и C_2 . При этом C_1 и C_2 в значительно большей степени зависят от смещения ротора. Именно их анализ осуществляется в дальнейшем.

Очевидно, величина емкости ИП зависит от ширины электрода. На рисунке 3,б приведены зависимости величин C_0 , C_1 и C_2 в зависимости от смещения ротора при k_z и k_h равных 1,875 и 0,4. Анализ этих кривых показывает, что уменьшение ширины электрода ИП в два раза сопровождается снижением емкости C_0 примерно 1,5 раза. При этом величины C_1 и C_2 изменяются незначительно.

Сокращение раскрытия паза ротора в свою очередь должно привести к уменьшению переменной составляющей емкости ИП. На рисунке 4 приведены зависимости величин C_0 , C_1 и C_2 в зависимости от смещения ротора при k_z и k_h равных 1,0 и 0,4. Анализ этих кривых показывает, что увеличение воздушного зазора до величины $\delta_n = 0,003$ сопровождается снижением емкости C_0 примерно в 1,6 раза. При этом величины C_1 и C_2 уменьшаются в 2 раза.

Емкостный ИП в виде пазового клина с электродом из металлической фольги [9, 10] при реализации системы диагностики смещения ротора обычно подключается в одно из плеч измерительного моста. В связи с этим погрешности измерения такого ИП будут определены емкостью соединительных проводов и ЭДС, индуцируемой

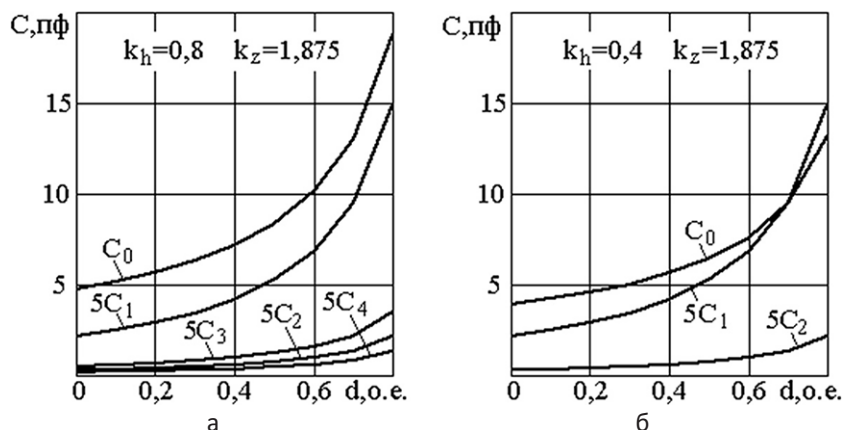


Рисунок 3 – Зависимости величин членов ряда емкости ИП от величины смещения ротора

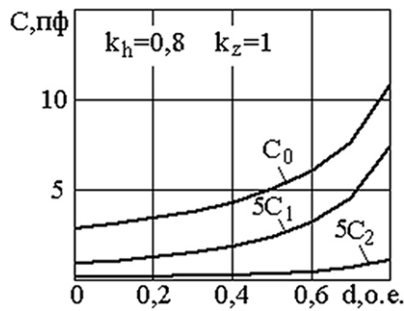


Рисунок 4 – Зависимости величин членов ряда емкости ИП от величины смещения ротора

в них. От этой ЭДС в значительной мере можно избавиться путем использования экранированного или скрученного провода. А так как у такого провода емкость постоянная, то в результате изменяется только величина C_0 . В связи с этим предпочтительным является использование для диагностирования переменной составляющей емкости ИП, на которую емкость соединительных проводов влияния не оказывает.

В связи с этим для реализации системы диагностики эксцентриситета ротора АД с открытыми пазами можно воспользоваться блок-схемой на рисунке 5, где 1 – ИП; 2 – измерительный мост; 3 – полосовой заграждающий фильтр с частотой f_0 , которая в зависимости от размера открытия паза статора может колебаться в пределах 500-2000 Гц АД; 4 – источник переменного тока с частотой f_0 ; 5 – источник постоянного тока; 6 и 7 – пороговые элементы с порогами срабатывания U_{cp1} и U_{cp2} , при $U_{cp1} < U_{cp2}$; 8 и 9 – блоки индикации и формирования отключающего сигнала. В такой блок-схеме в качестве информационного признака повреждения используется переменная состав-

ляющая емкости ИП.

Если считать, что при отсутствии эксцентриситета ротора мост 2 был сбалансирован, то смещение вала ротора по горизонтали, например, влево или вправо на величину d , приводит к увеличению или уменьшению расстояния между электродом 2 ИП и поверхностью вала и к разбалансировке моста. В результате на его выходе появится напряжение U_2 , а на выходе полосового фильтра U_3 . И если напряжение U_3 превысит порог срабатывания порогового элемента U_{cp1} , то на его выходе появится напряжение U_6 , а блок 6 отразит информацию «СМЕЩЕНИЕ РОТОРА». Если при дальнейшем смещении ротора напряжение U_3 на выходе фильтра 6 превысит порог срабатывания U_{cp2} порогового элемента 7, то этот пороговый элемент дополнительно сформирует сигнал на отключение АД.

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 проводов ИП.

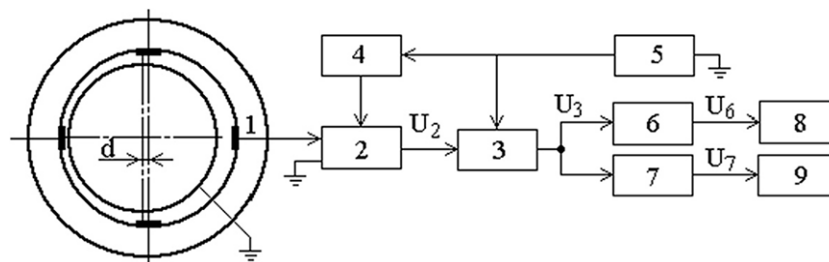


Рисунок 5 – Блок-схема устройства диагностики эксцентриситета ротора АД

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanov-Smolensky A.V. Electric machines. – Moscow: Energia, 2006. – 909 p. // <https://en.booksee.org/book/561736>.
2. Novozhilov A.N., Yusupova A.O., Potapenko A.O. Method of modeling the electrical capacitance of a measuring converter. The journal «Bulletin of Mechanical Engineering», No. 9, 2021, Moscow.
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. – 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 *Przegląd elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 6/2018
5. A.N. Novozhilov, A.O. Yusupova, T.A. Novozhilov. The choice of a method for detecting the eccentricity of the rotor of an electric machine / *Bulletin of PSU. No. 4. Energy Series.* – Pavlodar, 2016, pp. 117-126.
6. A.N. Novozhilov, A.O. Yusupova, T.A. Novozhilov. Selection of the type of capacitive measuring transducer for the diagnosis of the eccentricity of the rotor of an electric machine / *Materials of the international conference «17 Satpayev Readings»*, volume 19, pp. 133-138.
7. Innovative patent of RK. No. 25896, IPC N02N 7/06, N02N 7/08, N02K 11/00 Method for diagnosing the eccentricity of the rotor of an electric machine / Novozhilov A.N., Isupova N.A. Applicant and patent holder S. Toragyrov Pavlodar State University (KZ). – No. 2011/0753.1.
8. Novozhilov, A., Yussupova A., Assainov, G., Novozhilov, T., Manukovsky, A. Sources of independent power supply for protection relay / *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 5, 2018, pp. 23-26.
9. Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T. A Device for Determining the Rotor Eccentricity of Rotating Electric Machines. *Russian Electrical Engineering*, no. 2, pp. 32-35.
10. Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T. Determining the Displacement of the Rotor Shaft in an Electrical Machine. *Russian Engineering Research*, 2019, no. 10, pp. 827-830. Allerton Press, Inc., 2019.

Ыдыстық өлшеу түрлендіргіші бар асинхронды қозғалтқыш роторының эксцентриситетін диагностикалау жүйесі

^{1*}**ЮСУПОВА Әсел Оразқызы**, PhD, қауымдастырылған профессор, aselp@mail.ru,

¹**ПОТАПЕНКО Александра Олеговна**, PhD, қауымдастырылған профессор, alxopt@gmail.com,

¹Торайғыров университеті, Қазақстан, Павлодар, Ломов көшесі, 64,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Қазіргі уақытта асинхронды қозғалтқыш роторының эксцентриктерілікін 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.

Кілт сөздер: диагностика жүйесі, ротордың берілісі, ауа саңылауы, ротордың эксцентриктерілігі, сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіштері, сыйымдылықтың ауыспалы компоненті.

The System for Diagnosing the Eccentricity of the Rotor of an Asynchronous Motor with a Capacitive Measuring Converter

^{1*}**YUSSUPOVA Assel**, PhD, Associate Professor, aselp@mail.ru,

¹**POTAPENKO Alexandra**, PhD, Associate Professor, alxopt@gmail.com,

¹Toraighyrov University, Kazakhstan, Pavlodar, Lomov Street, 64,

*corresponding author.

Abstract. 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.

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

REFERENCES

1. Ivanov-Smolensky A.V. Electric machines. – Moscow: Energia, 2006. – 909 p. // <https://en.booksee.org/book/561736>.
2. Novozhilov A.N., Yusupova A.O., Potapenko A.O. Method of modeling the electrical capacitance of a measuring converter. The journal «Bulletin of Mechanical Engineering», No. 9, 2021, Moscow.
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. – 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 Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 6/2018
5. A.N. Novozhilov, A.O. Yusupova, T.A. Novozhilov. The choice of a method for detecting the eccentricity of the rotor of an electric machine / Bulletin of PSU. No. 4. Energy Series. – Pavlodar, 2016, pp. 117-126.
6. A.N. Novozhilov, A.O. Yusupova, T.A. Novozhilov. Selection of the type of capacitive measuring transducer for the diagnosis of the eccentricity of the rotor of an electric machine / Materials of the international conversion «17 Satpayev Readings», volume 19, pp. 133-138.
7. Innovative patent of RK. No. 25896, IPC N02N 7/06, N02N 7/08, N02K 11/00 Method for diagnosing the eccentricity of the rotor of an electric machine / Novozhilov A.N., Isupova N.A. Applicant and patent holder S. Toragyrov Pavlodar State University (KZ). – No. 2011/0753.1.
8. Novozhilov, A., Yussupova A., Assainov, G., Novozhilov, T., Manukovsky, A. Sources of independent power supply for protection relay / Przegląd Elektrotechniczny, no. 5, 2018, pp. 23-26.
9. Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T. A Device for Determining the Rotor Eccentricity of Rotating Electric Machines. Russian Electrical Engineering, no. 2, pp. 32-35.
10. Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T. Determining the Displacement of the Rotor Shaft in an Electrical Machine. Russian Engineering Research, 2019, no. 10, pp. 827-830. Allerton Press, Inc., 2019.