

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Современные вращающиеся электрические машины широко используются в электроэнергетике для производства электроэнергии и в качестве привода. Одним из их характерных механических повреждений является эксцентриситет ротора.

В настоящее время для выявления эксцентриситета ротора в основном используются методы, основанные на измерении величин вызванных появлением дополнительных магнитных полей. Однако их чувствительность ограничена необходимостью отстройки от помех, вызванных колебанием электрических параметров питающей сети и нагрузки. В этом отношении более перспективны системы диагностики эксцентриситета ротора, у которых в качестве измерительного преобразователя используются емкостные датчики. Однако метод расчета параметров измерительного преобразователя со сложной формой электродов отсутствует.

В предлагаемой работе представлен простой метод расчета емкостного измерительного преобразователя с произвольной формой электродов, основанный на моделировании электростатического поля этого преобразователя методом сеток и расчетом емкости по приведенной эмпирической формуле. Осуществлена проверка адекватности этого метода на примере определения емкости плоского конденсатора, величина которого определялась с использованием предлагаемого метода и по классической формуле. Показано, что погрешность моделирования не превысила 5 %.

В качестве примера использования данного метода осуществлено определение емкости для электродов с зубчатой поверхностью ротора электрической машины в разных положениях пластины измерительного преобразователя относительно раскрытия паза. Приведен принцип формирования граничных условий и картины распределения потенциалов электростатического поля, а также рассчитаны емкости.

Ключевые слова: методика диагностики, эксцентриситет ротора, емкостные измерительные преобразователи.

В электроэнергетике, например, при диагностике 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) [1–4]. Как известно, изменение емкости этих преобразователей может происходить не только за счет перемещения контролируемого элемента машины, но и за счет вращения его на валу. Примером [4] этого может служить измерение эксцентриситета ротора в процессе эксплуатации, когда один из электродов ИП имеет постоян-

ные геометрические размеры, а другой представлен поверхностью вращающегося зубчатого сердечника ротора, как это показано на рис. 1а: 1 и 2 — сердечники статора и ротора; 3 — пазовый клин; 4 — электрод емкостного ИП; 5 — воздушный зазор ЭМ.

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.

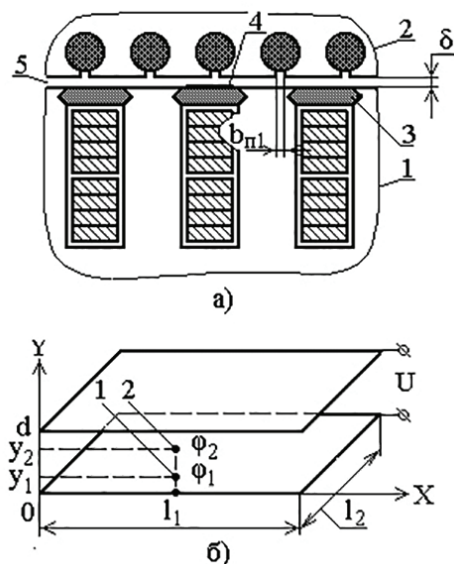


Рис. 1. Конструкционные особенности ЭМ и расчетная схема

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 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 рис. 1

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

где φ_1 и φ_2 — потенциалы электростатического поля в точках 1 и 2 относительно нижней пластины конденсатора; y_1 и y_2 — координаты y точек 1 и 2.

U и d — напряжение и расстояние между электродами конденсатора.

Тогда с учетом соотношений уравнения (1) для определения емкости воздушного плоского конден-

сатора можно воспользоваться эмпирической зависимостью

$$C = \varepsilon_0 l_1 l_2 \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{y_2 - y_1} = \varepsilon_0 l_1 l_2 \frac{\Delta\varphi}{\Delta y}, \quad (2)$$

где l_1 и l_2 — ширина и длина электродов конденсатора; ε_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 рис. 1 и [8, 9] используется уравнение Лапласа

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

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 то же время эту задачу достаточно просто решить с помощью метода сеток. В нем частные производные уравнения Пуассона (3) для i, k -го узла на рис. 2 заменяются выражениями

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

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

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

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

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 рис. 1б 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 по-

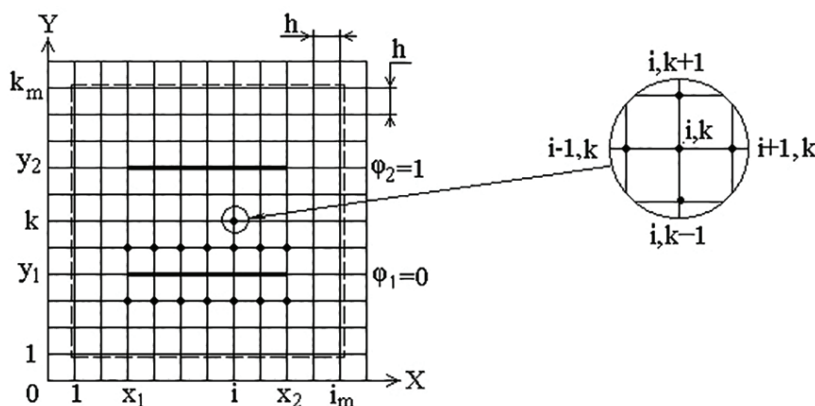


Рис. 2. Расчетная схема

казано на рис. 2, разбивается на квадратные клетки со стороной h . Пересекаясь, k -я горизонтальная линия с i -ой вертикальной линией образуют i, k -й 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 рис. 2 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.

При моделировании электростатического поля потенциал φ_2 верхнего электрода принимается равным единице, а нижнего φ_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 данного 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

$$C = \varepsilon_0 l_1 l_2 \frac{\sum_{i=1}^N \varphi_n / N - \varphi_1}{h} = \varepsilon_0 l_1 l_2 \frac{\sum_{i=1}^N \varphi_n}{N h}, \quad (9)$$

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

Если для расчетной схемы на рис. 2 принять $h = 0,01$ м, $k_m = 11$ и $i_m = 11$ 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 рис. 3.

При этом величина емкости ИП, рассчитанной по математическому выражению (9), и с использованием метода сеток равнялась 1,55 пФ и 1,442 пФ 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) при открытых пазах. Если принять ширину ИП l_1 , величину воздушного зазора δ и ширину раскрытия паза ротора b_{n1} равными 5, 3 и 3 клеткам, то результаты моделирования потенциалов в узлах при расположении электрода ИП над раскрытием паза ротора можно представить в виде таблицы, приведенной на рис. 4. При этом величина емкости ИП равнялась 2,628 пФ. В то же время при расположении электрода ИП над серединой зубца рото-

	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	0.74
	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	0.73	0.76	0.79	0.81	0.82	0.83	0.82	0.80	0.76	0.73	0.71	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	0.61
	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	0.51
	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	0.41
	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	0.27
	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	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	0.24
	0.00	0.25	0.24	0.23	0.21	0.20	0.19	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.24	0.00
		1												i_m

Рис. 3. Результаты моделирования потенциалов в узлах электростатического поля двух плоских электродов

	$\varphi=0$			$\varphi=1$					$\varphi=0$					
k_m	0.00	0.00	0.00	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.42	0.00	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	0.12	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	0.14	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	0.10	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	0.00	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	0.00	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	0.00	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	0.00	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	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	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	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		1	$\varphi=0$							$\varphi=0$				i_m

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

k_m	$\varphi=1$				$\varphi=0$				$\varphi=1$			
	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00
1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	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	0.65
0.41	0.41	0.38	0.32	0.24	0.17	0.14	0.16	0.21	0.30	0.38	0.42	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	0.24
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	0.00	0.04	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	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	0.01	0.00	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	0.00	0.00
	1	$\varphi=0$							$\varphi=0$	i_m		

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

ра эта емкость равнялась 2,736 пФ, как показано на рис. 5.

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

$$C_{un} = C_{un,0} + C_{un,m} \sin(2\pi f_2 t), \quad (10)$$

где $C_{un,0}$ и $C_{un,m}$ — постоянная составляющая и амплитуда переменной составляющей емкости ИП; $f_2 = n Z_2/60$ — частота колебаний переменной составляющей емкости ИП; n — число оборотов ротора в минуту; t — время.

По результатам определения сеток на рис. 4 величины емкостей $C_{un,0} = 2,682$ пФ и $C_{un,m} = 0,054$ пФ.

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

Библиографический список

1. Новожилов А. Н., Юсупова А. О., Новожилов Т. А. Выбор метода выявления эксцентриситета ротора электрической машины // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. 2016. № 4. С. 117–126.
2. Beker L., Maralani A., Lin L. Modeling, fabrication, and characterization of SiC concentrically matched differential capacitance output pressure sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 2018. Vol. 273. P. 293–302. DOI: 10.1016/j.sna.2018.02.027.
3. Hu H. L., Xu T. M., Hui S. E. A high-accuracy, high-speed interface circuit for differential-capacitance transducer // Sensors and Actuators A: Physical. 2006. Vol. 125, Issue 2. P. 329–334. DOI:10.1016/j.sna.2005.08.009.
4. Ацюковский В. А. Емкостные дифференциальные датчики перемещения емкости. М.: Госэнергоиздат, 1960. 102 с.
5. Расчет электрической емкости / Под ред. Ю. Я. Йосселя, Э. С. Кочанова, М. Г. Струнского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 288 с.
6. Дзежора А. А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета. Минск: Белорусская наука, 2008. 352 с. ISBN 978-985-08-0888-2.

7. Kawa A., Stala R. The Multilevel switched capacitor power converter. Experimental proof of concept // Przegląd Elektrotechniczny. 2017. Vol. 9. P. 16–19. DOI: 10.15199/48.2017.09.03.

8. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1967. 775 с.

9. Turowski J. Obliczenia elektromagnetyczne elementow maszyn i urzadzen elektrycznych. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1982. 200 p.

10. Гринберг Г. А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. М.: АН СССР, 1948. 727 с.

НОВОЖИЛОВ Тимофей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета.

SPIN-код: 1328-6928

AuthorID (РИНЦ): 554534

Адрес для переписки: timokvey@mail.ru

НОВОЖИЛОВ Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор (Республика Казахстан), профессор кафедры «Электроэнергетика» Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова (ПГУ).

SPIN-код: 2733-2943

AuthorID (РИНЦ): 189494

Адрес для переписки: novozhilova_on@mail.ru

ЮСУПОВА Асель Оразовна, магистр электроэнергетики, докторант кафедры «Электроэнергетика» ПГУ.

Адрес для переписки: aselasp@mail.ru

Для цитирования

Новожилов Т. А., Новожилов А. Н., Юсупова А. О. Моделирование электрической емкости измерительного преобразователя // Омский научный вестник. 2018. № 5 (161). С. 72–75. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-72-75.

Статья поступила в редакцию 25.07.2018 г.

© Т. А. Новожилов, А. Н. Новожилов, А. О. Юсупова