

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРПУСНОЙ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЕ

А.В. Беспрозванных^{1*}, докт.техн.наук, И.А. Костюков¹, канд.техн.наук, А.В. Рогинский²

¹– Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",
ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, Украина. E-mail: bezprozvannych@kpi.kharkov.ua

²– Государственное предприятие «Завод «Электротяжмаш»»,
пр. Московский, 299, Харьков, 61089, Украина.

Представлена T-образная схема замещения асинхронного фазового двигателя с глухим соединением в «звезду» фаз обмотки статора. Приведены расчетные и экспериментальные частотные зависимости добротности цепи «фаза–фаза» в зависимости от тангенса угла диэлектрических потерь корпусной изоляции. Установлено, что на резонансной частоте в режиме измерения индуктивности характеристики электроизоляционной системы значимо отличаются в сравнении с режимом измерения емкости корпусной системы электрической машины. Библ. 22, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: корпусная электроизоляционная система, обмотки статора, схема замещения, метод комплексных сопротивлений, добротность, резонансная частота, тангенс угла диэлектрических потерь.

Введение. В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция замены электроприводов постоянного тока на электроприводы переменного тока во всех отраслях, в том числе и на электро-транспорте, построенные на базе асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором [1–3]. Так, в мировом опыте эксплуатации железнодорожного транспорта развитию электровозов с трех-фазными асинхронными тяговыми электрическими двигателями (АТЭД) давно придается приоритетное значение [1–4].

Эксплуатация АТЭД происходит в более тяжелых условиях, чем электрических машин, расположенных в стационарных установках [5–7]. Помимо воздействия повышенной механической, электродинамической и тепловой нагрузок негативное влияние на электрическую изоляцию обмоток двигателя оказывают значительные перенапряжения на обмотках двигателя при применении частотно-регулируемого электропривода. Электрическая изоляция АТЭД является одним из критических элементов, определяющих надежность подвижного состава. Статистические данные отказов асинхронных двигателей общепромышленного назначения показывают, что основные повреждения приходятся на обмотки двигателя – до 85–95 %, и только 2–5 % отказывают из-за повреждений подшипников [8].

Методы исследования. Применение новых материалов на основе предварительно пропитанных слюдобумажных лент с технологией вакуум-нагнетательной пропитки обеспечивает создание термореактивной композитной электроизоляционной системы высоковольтных АТЭД [9–10]. Компоненты системы изоляции, состоящие из изоляции обмотки и основной изоляции с высокой долей содержания слюды, а также эпоксидной смолы, оптимально адаптированы друг к другу. Во время процесса пропитки изоляция подлежит постоянному контролю, в ходе которого все характеристики, такие как вязкость смолы, температура пропитки и отверждения, время выдержки под давлением, пониженное и избыточное давление проверяются и документируются [10].

Структура мониторинга электрических параметров в рамках выборочных испытаний на технологической стадии изготовления электроизоляционных систем в значительной мере определяют эксплуатационные характеристики и надежность асинхронных ТЭД [11–12].

Сопротивление изоляции является традиционным параметром для оценки ее состояния как на стадии изготовления, так и эксплуатации ТЭД [13–14]. Для высоковольтных ТЭД сопротивление изоляции относительно корпуса (нижнее пороговое значение) должно быть не менее 40 МОм при постоянном напряжении 2500 В [14]. Сопротивление изоляции измеряется на постоянном токе специальными современными тестерами на напряжение до 10 кВ [15]. Но процессы, связанные с недоотверждением эпоксидной смолы, расслоением изоляции и образованием воздушных включений сложно идентифицировать при одном значении приложенного постоянного напряжения.

Для определения степени увлажненности изоляции производятся измерения сопротивления на 15-й (R_{15}) и 60-й (R_{60}) секундах, а также на десятой минуте (R_{10}) после подачи испытательного напряжения. Коэффициенты диэлектрической абсорбции (DAR) и индекс поляризации (PI) определяются соответственно [15]

$$DAR = R_{15}/R_{60}, \quad PI = R_{60}/R_{10}.$$

Для электроизоляционных материалов с малой степенью или отсутствием эффекта абсорбции параметры диэлектрической абсорбции имеют значения, близкие к единице. Нечувствительность к локальным повреждениям ограничивает применимость данных параметров для оценки общего старения изоляции и степени увлажненности.

Более информативными показателями состояния изоляции являются токи поляризации и деполяризации [16], которые отражают как поляризационные процессы, в том числе межфазную и дипольную поляризацию, связанную, например, с наличием влаги в толще композитной полимерной изоляции, так и процессы проводимости, обусловленные наличием свободных зарядов. Токи зарядки и разрядки измеряются в течение длительного времени пикоамперметром (высокочувствительным электрометром), что является проблематичным в заводских условиях.

В диэлектрической спектроскопии выполняется анализ функции диэлектрического отклика изоляции на основе измерений тока и напряжения в зависимости от частоты [17–18]. Но такие измерения выполняются либо на образцах электроизоляционных материалов в диапазоне частот до 100 МГц, либо на самой электроизоляционной системе в диапазоне низких частот: от 0,001 до 1 кГц.

В работе [20] приведены результаты применения диэлектрической спектроскопии для оценки состояния корпусной термореактивной электроизоляционной системы асинхронных тяговых двигателей. Показано, что при двухэлектродном подключении одной из фаз и корпуса измеряются совокупные характеристики емкости и тангенса угла диэлектрических потерь [21] корпусной изоляционной системы всех трех фаз. Установлено, что вблизи резонансной частоты 10 кГц тангенс угла диэлектрических потерь корпусной системы всех трех фаз может изменяться в десятки раз [20]. Это дает возможность контролировать состояние композитной изоляции в режиме измерений совокупных диэлектрических параметров всех трех фаз на переменном токе [20].

Оценить состояние изоляции двух фаз по такой схеме измерений не представляется возможным. Такая задача может быть решена в режиме измерений «фаза–фаза», когда контролируются совокупные параметры индуктивности и добротности обмоток двух фаз, соединенных последовательно.

Целью данной работы является анализ характеристик корпусной электроизоляционной системы в режиме измерений параметров индуктивности и добротности на резонансной частоте асинхронного тягового электрического двигателя.

Постановка задачи. Рассмотрим асинхронный фазовый двигатель, у которого фазы обмотки статора соединены в «звезду» и не имеют вывода нулевой точки (глухое соединение фаз обмотки). Каждую обмотку представим T-образной схемой замещения [22]. Ограничимся рассмотрением случая, когда проводятся измерения цепи фаза–фаза (например, A - O - B). Третья фаза взаимодействует с первыми двумя через емкостные токи на корпус.

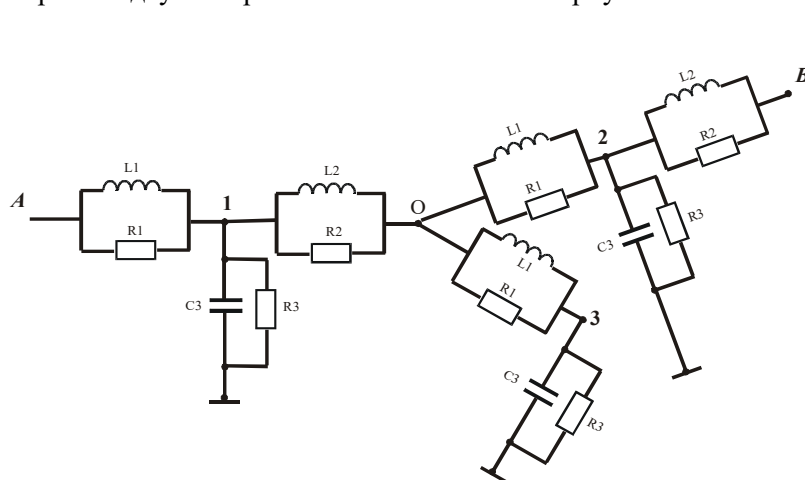


Рис. 1

пренебрегаем. Полуобмотки в схеме замещения представим параллельно соединенными сопротивлениями и индуктивностями для учета снижения их добротности с ростом частоты [22].

На схеме замещения, показанной на рис. 1, обозначено: R_1 , L_1 , R_2 , L_2 – омические сопротивления и индуктивности обмоток измеряемых фаз; C_3 , R_3 – емкость и эквивалентное сопротивление корпусной изоляционной системы соответственно. Резистор R_3 , включенный параллельно, отражает сопротивление утечки изоляции (при измерениях на постоянном токе)

или эквивалентное сопротивление диэлектрических потерь (при измерениях на переменном токе) [22].

Подобные схемы удобнее рассчитывать методом комплексных сопротивлений [22].

Для расчета комплексного сопротивления цепи *A-O-B* две «звезды» сопротивлений между узлами 1, 2 и 3 заменим эквивалентными треугольниками. Рассмотрим последовательность получения комплексного сопротивления цепи *A-O-B*.

Для звезды индуктивных сопротивлений с центром в узле *O*

$$\underline{ZL}_{12} = \underline{ZL}_{10} + \underline{ZL}_{20} + (\underline{ZL}_{10} \cdot \underline{ZL}_{20}) / \underline{ZL}_{30}, \quad (1)$$

где \underline{ZL}_{10} – комплексное сопротивление индуктивного луча «звезды» между узлами 1 и *O*; \underline{ZL}_{20} , \underline{ZL}_{30} – аналогичные сопротивления двух других лучей индуктивной «звезды» с центром в точке *O*; \underline{ZL}_{12} – сопротивление плеча эквивалентного треугольника сопротивлений с вершинами в узлах 1, 2.

Параметры плечей эквивалентного треугольника \underline{ZL}_{13} , \underline{ZL}_{23} определяются аналогично.

Для звезды емкостных сопротивлений с центром в узле заземления (*g*)

$$\underline{ZC}_{12} = \underline{ZC}_{1g} + \underline{ZC}_{2g} + (\underline{ZC}_{1g} \cdot \underline{ZC}_{2g}) / \underline{ZC}_{3g}, \quad (2)$$

где \underline{ZC}_{1g} – комплексное сопротивление емкостного луча «звезды» между узлами 1 и *g*; \underline{ZC}_{2g} , \underline{ZC}_{3g} – аналогичные сопротивления двух других лучей; \underline{ZC}_{12} – сопротивление плеча 1–2 эквивалентного треугольника емкостных сопротивлений с вершинами в узлах 1, 2 и 3.

Параметры плечей эквивалентного треугольника \underline{ZC}_{13} , \underline{ZC}_{23} определяются аналогично.

После перехода к эквивалентным треугольникам схему замещения цепи катушек *A-O-B* представим в виде, показанном на рис. 2. Комплексное сопротивление запишем в виде

$$\underline{Z} = \underline{Z}_{A-1} + \underline{Z}_{12} \parallel (\underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{23}) + \underline{Z}_{2-B}. \quad (3)$$

Из (3) определим искомые эквивалентные индуктивность и добротность цепи

$$R_e = \text{real}(\underline{Z}); \quad \omega L_e = \text{imag}(\underline{Z}); \quad L_e = \text{imag}(\underline{Z}) / \omega; \quad Q_e = \omega L_e / R_e. \quad (4)$$

Частотные характеристики корпусной электроизоляционной системы АТЭД в режиме измерений параметров индуктивности и добротности. Добротность *Q*, характеризующая потери энергии в цепях с индуктивностями, является величиной, обратно пропорциональной тангенсу угла потерь: $Q_e = 1/\text{tg}\delta$ [22]: измеряя добротность катушек, можно оценивать и диэлектрические потери в корпусной электроизоляционной системе.

На рис. 3, рис. 4 показаны расчетные частотные совокупные параметры индуктивности и добротности обмоток двух фаз, соединенных последовательно. Влияние емкости корпусной изоляционной системы на резонансную частоту модуля комплексного сопротивления цепи *A-O-B* двух катушек представлено на рис. 3: кривая 1 соответствует случаю, когда $C3=25$ нФ; кривая 2 – 50 нФ; кривая 3 – 75 нФ. Расчеты выполнены для одинаковых значений индуктивности обмоток $L1=L2=35$ нГн и добротности $Q=40,0$. Зависимости от частоты эквивалентной индуктивности и добротности получены для емкости корпусной системы каждой фазы, равной $C3=17$ нФ (рис. 4): сплошные линии – расчет по схеме рис. 1; точки – экспериментальные данные.

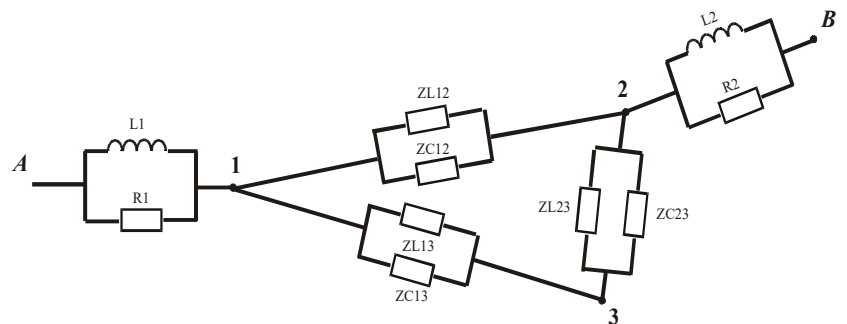


Рис. 2

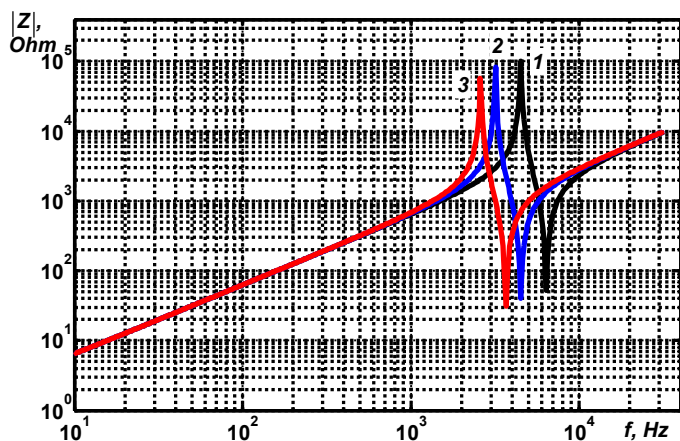
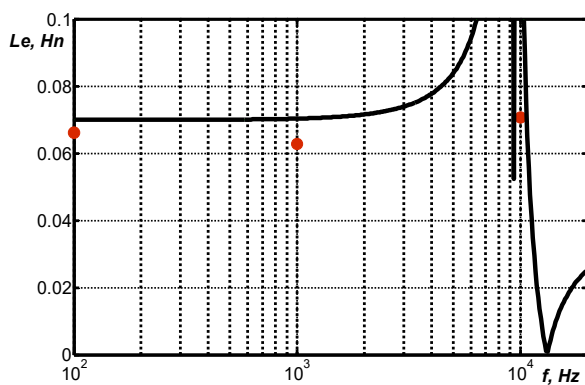


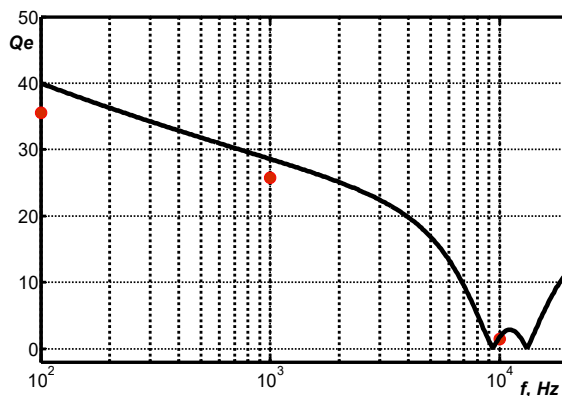
Рис. 3

Как показывают расчеты, для разных значений тангенса угла диэлектрических потерь изоляции частотные зависимости добротности практически совпадают во всем диапазоне частот (рис. 5, а), кроме резонансной вблизи частоты 10 кГц (рис. 5, б).

На рис. 5, б кривая 1 соответствует тангенсу угла диэлектрических потерь композитной изоляции, равной 3%. Кривая 2 – 6%, кривая 3 – 12%. Увеличение тангенса угла диэлектрических потерь композитной изоляции в два раза приводит к увеличению добротности в 1,12 раза (сравни кривые 1 и 2) и 1,21 раза (сравни кривые 2 и 3) соответственно.

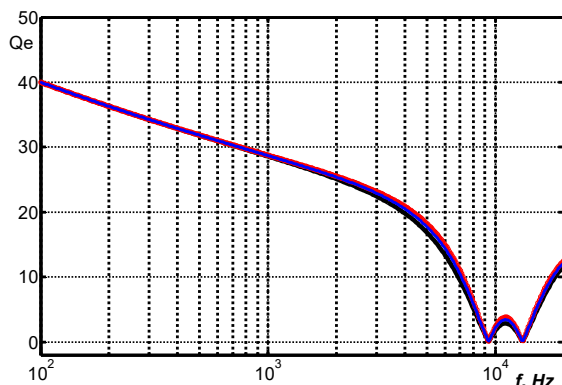


а)

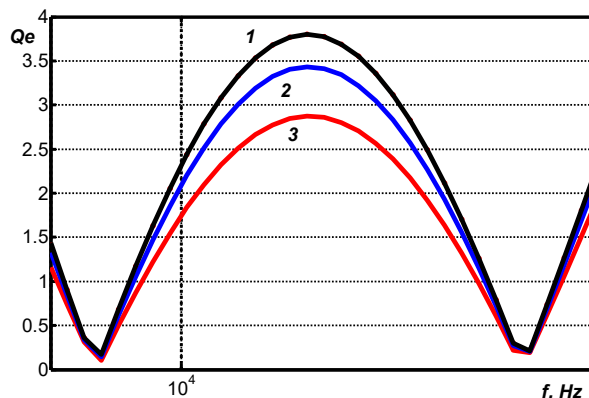


б)

Рис. 4



а)



б)

Рис. 5

В таблице приведены частотные характеристики двух образцов асинхронного тягового двигателя, находящихся в эксплуатации. Результаты представляют усредненные значения 10-кратных наблюдений.

При частотах, меньше резонансной, различие в результатах измерения добротности обмоток двух фаз соединенных последовательно образцов двигателей незначительно.

На резонансной частоте 10 кГц добротность корпусной изоляционной системы для каждого из образцов имеет значимые различия. Так, для первого образца добротность обмоток фаз *A-O-C* меньше добротности обмоток фаз *A-O-B* более, чем в 1,1 раза. Значит изоляция фаз *A-O-C* состарена в большей степени. Для второго образца добротность обмоток фаз *A-O-B* меньше добротности обмоток фаз *B-O-C* в 1,23 раза. Значит изоляция фаз *A-O-B* состарена в большей степени. Проведение диагностических обследований на резонансной частоте в режиме измерений добротности двух фаз электрической машины дает возможность качественно оценить степень теплового старения изоляции.

На резонансной частоте среднее значение добротности обмоток равно 1,23 и 1,63 для первого и для второго образцов АТЭД соответственно. Очевидно, что изоляция первого двигателя состарена в большей степени, чем второго: для нее среднее значение добротности на резонансной частоте в 1,34 раза меньше.

По величине тангенса угла диэлектрических потерь на резонансной частоте корпусная изоляция обеих электрических машин практически одинакова: 42% – для первого, 43% – для второго. Это означает, что тепловое старение корпусной изоляции произошло в них примерно одинаково. При частотах, меньше резонансной, различие в свойствах корпусной изоляции проявляется более выражено: для первого АТЭД $tg\delta_{0,1кГц} = 10,9\%$ и $tg\delta_{1кГц} = 5,3\%$, для второго – $tg\delta_{0,1кГц} = 7,4\%$ и $tg\delta_{1кГц} = 3,2\%$ соответственно. Рост тангенса угла диэлектрических потерь с уменьшением частоты характерен для увлажненной изоляции [20]. Очевидно, что для первого образца двигателя изоляция увлажнена сильнее. Причиной этого могут быть микротрещины, обладающие гигроскопическими свойствами, образовавшиеся в процессе эксплуатации двигателя.

Первый образец двигателя имеет все признаки ухудшения технического состояния как по результатам обследований добротности на резонансной частоте, так и тангенса угла диэлектрических потерь при частотах, меньших резонансной. Очевидно, что первый образец АТЭД необходимо направить в ремонт в первую очередь. Параметры второго образца можно измерить, например, через год. При наличии быстрого дрейфа параметров по результатам обследований следует принять решение о ремонте.

Образец АТЭД напряжение 1410 В, мощность 410 кВт	Частоты измерений, кГц					
	0,1		1		10	
	<i>C</i> , нФ	<i>tgδ</i> , %	<i>C</i> , нФ	<i>tgδ</i> , %	<i>C</i> , нФ	<i>tgδ</i> , %
Совокупные диэлектрические параметры корпусной системы трех фаз асинхронного двигателя	Образец 1					
	45,80	10,89	48,18	5,25	2,750	42,22
	Образец 2					
	45,639	7,435	47,473	3,151	2,8639	43,016
Совокупные параметры индуктивности и добротности обмоток двух фаз, соединенных последовательно	<i>L</i> , мГн	<i>Q</i>	<i>L</i> , мГн	<i>Q</i>	<i>L</i> , мГн	<i>Q</i>
	Образец 1					
<i>A-O-B</i>	66,68	35,65	63,33	24,05	60,78	1,3013
<i>B-O-C</i>	66,75	35,76	63,38	24,04	65,12	1,2244
<i>A-O-C</i>	66,77	35,57	63,38	23,72	61,10	1,1695
Образец 2						
<i>A-O-B</i>	66,18	35,56	62,85	25,71	70,72	1,4647
<i>B-O-C</i>	66,07	35,51	62,76	25,57	73,29	1,8145
<i>A-O-C</i>	66,15	35,17	62,81	25,64	75,30	1,6077

Заключение. 1. Выполнен анализ характеристик корпусной электроизоляционной системы в режиме измерений параметров индуктивности и добротности на резонансной частоте тягового асинхронного электрического двигателя.

На основе расчета частотных характеристик цепи «фаза–фаза» с глухим соединением в «звезду» фаз обмотки статора методом комплексных сопротивлений установлено, что для разных значений тангенса угла диэлектрических потерь корпусной изоляции частотные зависимости добротности цепи мало отличаются во всем диапазоне частот, за исключением резонансной частоты вблизи 10 кГц.

2. Достоверность результатов численного расчета совокупных характеристик обмоток двух фаз, соединенных последовательно, подтверждается проведенными измерениями двух образцов высоковольтного асинхронного тягового двигателя.

Степень теплового старения корпусной изоляции сравниваемых электрических машин в режиме измерения емкости, оцениваемая по параметру тангенса угла диэлектрических потерь на резо-

нансной частоте, практически одинакова. По величине добротности на резонансной частоте в режиме измерения индуктивности – разная.

3. Добротность является чувствительным параметром к состоянию композитной изоляции электрических машин. Параметр добротности обмоток на резонансной частоте можно рассматривать в качестве диагностического признака в оценке технического состояния изоляции электрических машин.

4. Комплексные диагностические обследования корпусной электроизоляционной системы в режиме измерения добротности на резонансной частоте и в режиме измерения тангенса угла диэлектрических потерь при частотах, меньше резонансной, позволяют выявить процессы теплового старения и увлажнения изоляции и оценить техническое состояние асинхронных электрических машин как на технологической стадии изготовления, так и в эксплуатации.

1. Vukosavic S.N. *Electrical Machines*. New York: Springer-Verlag, 2013. 650 p.
2. Устенко А.В., Пасько О.В. Тенденции развития тяговых двигателей подвижного состава. *Електротехніка і електромеханіка*. 2013. № 1. С. 65-68.
3. Kolpakchyan P.G., Shaikhiev A.R., Kochin A.E., Perfiliev K.S., Otypka Jan, Sukhanov A.V. The Determination of the Asynchronous Traction Motor Characteristics of Locomotive. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2017. Vol. 15. No 2. Pp. 130-135.
4. IEC 60349-1 Ed. 2.0 b: 2010 Electric traction – Rotating electrical machines for rail and road vehicles. Part 1: Machines other than electronic converter-fed alternating current motors. 2010. 129 p.
5. Яцько С.И., Карпенко В.В., Василенко Д.Ю. Исследования устойчивости систем изоляции тяговых электрических машин к воздействию климатических факторов. *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2010. № 4. С. 134-140.
6. Shanel M. Electrical insulation options for hybrid and electric vehicle applications in passenger vehicles, buses and trucks. Technical Report. DuPont, 2016. 63 p.
7. Смирнов В.П., Лексаков В.В., Шарапов Д.В., Кармаданов Е.Г. Износ изоляции тяговых электрических машин. *Наука и техника транспорта*. 2012. № 4. С. 62-64.
8. Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. Institution of Engineering and Technology, 2008. 304 p.
9. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H. *Electrical Insulation for Rotating Machines: design, evaluation, aging, testing and repair*. IEEE Press: John Wiley & Sons, 2004. 389 p.
10. Огоньков В.Г., Серебрянников С.В. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин. Москва: Издательский дом МЭИ, 2012. 304 с.
11. Baranski M., Decner A., Polak A. Selected Diagnostic Methods of Electrical Machines Insulation Operating in Industrial Conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. No 5. Pp. 2047-2054.
12. Титко А.И., Васьковский Ю.Н. Научные основы, методы и средства диагностики асинхронных двигателей. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2015. 300 с.
13. IEC 60034-18-1:2010 Rotating electrical machines. Part 18-1: Functional evaluation of insulation systems. General guidelines. 2010. 33 p.
14. Беспрозванных А.В., Рогинский А.В. Мониторинг стабильности технологического процесса изготовления электроизоляционных систем тяговых электрических машин. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 6. С. 65-68. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.10>
15. Stone G.C. Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Vol. 20. No 6. Pp. 2073-2080.
16. Sasic M., Stone G.C. Experience with DC polarization-depolarization measurements on stator winding industry. Proc. IEEE *Electrical Insulation Conference*. Ottawa, ON, Canada, June 2-5, 2013. Pp. 7-10.
17. Беспрозванных А.В., Кессаев А.Г., Щерба М.А. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от степени увлажнения полиэтиленовой изоляции кабелей. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 18-24. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.018>
18. Farahani, M., Borsi, H., Gockenbach E. Study of capacitance and dissipation factor tip-up to evaluate the condition of insulating systems for high voltage rotating machines. *Electrical Engineering*. 2007. Vol. 89. No 4. Pp. 263-270.
19. Younsi K., Neti P., Shah M., Zhou J.Y., Krahn J., Weeber K., Whitfield C.D. On-Line Capacitance and Dissipation Factor Monitoring of AC Stator Insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2010. Vol. 17. No 5. Pp. 1441-1452.

20. Беспрозванных А.В., Рогинский А.В. Диэлектрическая спектроскопия корпусной термореактивной композитной электроизоляционной системы асинхронных тяговых электрических машин. *Електротехніка і електромеханіка*. 2018. № 1. С. 17-20. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.02>

21. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Влияние паразитных емкостей на результаты измерений параметров многожильных кабелей при оценке их технического состояния. *Электричество*. 2011. № 5. С. 27-36.

22. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. Х.: НТУ "ХПИ", 2012. 108 с.

УДК 621.315.4

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН НА РЕЗОНАНСНІЙ ЧАСТОТІ

Г.В. Безпрозванных¹, докт.техн.наук, І.О. Костюков¹, канд.техн.наук, О.В. Рогинський²

¹ – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
вул. Кірпичова, 21, Харків, 61002, Україна.

E-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

² – Державне підприємство "Завод "Електроважмаш",
пр. Московський, 299, Харків, 61089, Україна.

Представлено T-подібну заступну схему асинхронного фазового двигуна з глухим з'єднанням у «зірку» фаз обмотки статора. Наведено розрахункові та експериментальні частотні залежності добротності ланки «фаза–фаза» залежно від тангенса кута діелектричних втрат корпусної ізоляції. Встановлено, що на резонансній частоті в режимі вимірювання індуктивності характеристики електроізоляційної системи суттєво відрізняються у порівнянні з режимом вимірювання ємності корпусної системи електричної машини.

Бібл. 22, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: корпусна електроізоляційна система, обмотки статора, схема заміщення, метод комплексних опорів, добротність, резонансна частота, тангенс кута діелектричних втрат.

CHARACTERISTICS OF CASED ELECTRICAL INSULATION SYSTEM OF ASYNCHRONOUS ELECTRICAL MACHINES AT RESONANCE FREQUENCY

G.V. Bezprozvannykh¹, I.A. Kostukov¹, A.V. Roginskiy²

¹ – National Technical University Kharkov Polytechnic institute,
str. Kirpichova, 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.

E-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

² – SE Plant Electrotyazhmash,
pr. Moskovskiy, 299, Kharkiv, 61089, Ukraine.

A T-shaped equivalent circuit of an asynchronous phase motor with a deaf connection into the "star" of the stator winding phases is presented. The calculated and experimental frequency dependences of the quality factor of the "phase-phase" circuit as a function of the dielectric loss tangent of the cabinet insulation are given. It was found that at the resonant frequency in the inductance measurement mode, the characteristics of the electrically insulating system are significantly different in comparison with the measurement mode of the capacitance of the housing system of the electric machine. References 22, table 1, figures 4.

Key words: corpus electrical insulation system, stator windings, equivalent circuit, impedance method, quality factor, resonance frequency, dielectric loss tangent.

1. Vukosavic S.N. Electrical Machines. New York: Springer-Verlag, 2013. 650 p.

2. Ustenko A.V., Pasko O.V. Trends in the development of traction engines of rolling stock. *Electrical engineering & Electromechanics*. 2013. No 1. Pp. 65-68. (Rus)

3. Kolpakhchyan P.G., Shaikhiev A.R., Kochin A.E., Perfiliev K.S., Otyпка Jan, Sukhanov A.V. The Determination of the Asynchronous Traction Motor Characteristics of Locomotive. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2017. Vol. 15. No 2. Pp. 130-135.
4. IEC 60349-1 Ed. 2.0 b: 2010 Electric traction – Rotating electrical machines for rail and road vehicles. Part 1: Machines other than electronic converter-fed alternating current motors. 2010. 129 p.
5. Yatsko S.I., Karpenko V.V., Vasilenko D.Yu. Investigations of the stability of isolation systems of traction electric machines to the effect of climatic factors. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho universytetu imeni Mikhaïla Ostrohradskoho*. 2010. No 4. Pp. 134-140. (Rus)
6. Shanel M. Electrical insulation options for hybrid and electric vehicle applications in passenger vehicles, buses and trucks. Technical Report. DuPont, 2016. 63 p.
7. Smirnov V.P., Lexakov V.V., Sharapov D.V., Karmadanov E.G. Insulation Wear of Traction Electrical Machines. *Nauka i tekhnika transporta*. 2012. No 4. Pp. 62-64. (Rus)
8. Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. Institution of Engineering and Technology, 2008. 304 p.
9. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H. Electrical Insulation for Rotating Machines: design, evaluation, aging, testing and repair. IEEE Press: John Wiley & Sons, 2004. 389 p.
10. Ogonkov V.G., Serebryannikov S.V. Electrical insulation materials and insulation systems for electrical machines. Moskva: Izdatelskii dom MEI, 2012. 304 p. (Rus)
11. Baranski M., Decner A., Polak A. Selected Diagnostic Methods of Electrical Machines Insulation Operating in Industrial Conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. No 5. Pp. 2047-2054.
12. Titko A.I., Vaskovsky Yu.N. Scientific basis, methods and diagnostic tools for asynchronous motors. Kyiv: Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, 2015. 300 p. (Rus)
13. IEC 60034-18-1:2010 Rotating electrical machines. Part 18-1: Functional evaluation of insulation systems. General guidelines. 2010. 33 p.
14. Bezprozvannykh, G.V., Roginskiy, A.V. The stability monitoring process of electrical insulating systems of traction electric machines. *Electrical engineering & Electromechanics*. 2017. No 6. Pp. 65-68. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.10>
15. Stone G.C. Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Vol. 20. No 6. Pp. 2073-2080.
16. Sasic M., Stone G.C. Experience with DC polarization-depolarization measurements on stator winding industry. Proc. IEEE *Electrical Insulation Conference*. Ottawa, ON, Canada, June 2-5, 2013. Pp. 7-10.
17. Bezprozvannykh G.V., Kessaev A.G., Shcherba M.A. Dielectric spectroscopy of polymeric insulation during conditioning power cables. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 18-24. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.018>
18. Farahani M., Borsi H., Gockenbach E. Study of capacitance and dissipation factor tip-up to evaluate the condition of insulating systems for high voltage rotating machines. *Electrical Engineering*. 2007. Vol. 89. No 4. Pp. 263-270.
19. Younsi K., Neti P., Shah M., Zhou J.Y., Krahn J., Weeber K., Whitfield C.D. On-Line Capacitance and Dissipation Factor Monitoring of AC Stator Insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2010. Vol. 17. No 5. Pp. 1441-1452.
20. Bezprozvannykh, G.V., Roginskiy, A.V. Dielectric spectroscopy of casing thermosetting composite electrical insulation system of induction traction electric machines. *Electrical engineering & Electromechanics*. 2018. No 1. Pp. 17-20. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.02>
21. Bezprozvannykh G.V., Naboka B.G. Influence of parasitic capacitance on the results of measurements of parameters of multicore cables in assessing their technical condition. *Elektrichestvo*. 2011. No 5. Pp. 27-36. (Rus)
22. Bezprozvannykh G.V., Naboka B.G. Mathematical models and methods of calculation of electrical designs. Kharkiv: NTU HPI, 2012. 108 p. (Rus)

Надійшла 17.12.2018
Остаточний варіант 05.04.2019