

А.В. Беспрозванных, А.В. Рогинский

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КОРПУСНОЙ ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Представлено схему заміщення обмоток статора при з'єднанні «зіркою» асинхронного тягового двигуна. За результату моделювання частотних залежностей ємності та тангенсу кута діелектричних втрат встановлено наявність двох резонансних частот в діапазоні 1 та 10 кГц. Показано, що вимірювання тангенсу кута діелектричних втрат ізоляційної системи на частоті 10 кГц чутливі до рівня діелектричних втрат в корпусній терморективній електричній ізоляції. Результати математичного моделювання узгоджуються з вимірюваннями сукупних діелектричних характеристик корпусної композитної електроізоляційної системи трьох фаз. Бібл. 9, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: терморективна композитна ізоляція, асинхронний тяговий двигун, діелектрична спектроскопія, схема заміщення, сукупна електрична ємність, тангенс кута діелектричних втрат, резонансна частота.

Представлено схему замещения обмоток статора при соединении «звездой» асинхронного тягового двигателя. На основании результатов моделирования частотных зависимостей емкости и тангенса угла диэлектрических потерь установлено наличие двух резонансных частот в диапазоне 1 и 10 кГц. Показано, что измерения тангенса угла диэлектрических потерь изоляционной системы на частоте 10 кГц чувствительны к уровню диэлектрических потерь в корпусной терморективной электрической изоляции. Результаты математического моделирования согласуются с измерениями совокупных диэлектрических характеристик корпусной композитной электроизоляционной системы трех фаз. Библ. 9, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: терморективная композитная изоляция, асинхронный тяговый двигатель, диэлектрическая спектроскопия, схема замещения, электрическая емкость, тангенс угла диэлектрических потерь, резонансная частота.

Введение. Сложные условия эксплуатации тяговых машин постоянного и переменного тока высокого напряжения предъявляют повышенные требования к электрической изоляции. Так, терморективная композитная электрическая изоляция тяговых электрических двигателей (ТЭД) подвергается значительному нагреву, воздействию влаги, перенапряжений, вибрации. Изоляция должна обладать достаточной электрической и механической прочностью, быть нагрево- и влагоустойчивой. Современные электроизоляционные материалы и технологии их изготовления позволили усовершенствовать системы высоковольтной терморективной композитной электрической изоляции двигателей, улучшить их эксплуатационные и энергетические характеристики [1]. Применение изоляции класса нагревостойкости Н (180 °С) повышает надежность ТЭД, позволяет при тех же размерах реализовать большую мощность. Такие системы изоляции способны работать не менее 50 тыс. часов при температуре 180 °С и выдерживать перенапряжения свыше 10 кВ.

Для электрической изоляции с высокой долей содержания слюды и эпоксидной смолы обмоток ТЭД используется как технология вакуум-нагнетательной пропитки, так и предварительно пропитанных лент. Процедура вакуум-нагнетательной пропитки гарантирует высокую механическую прочность, особенно лобовой части обмотки, и высокую электрическую прочность. Во время процесса пропитки изоляционной системы измеряется вязкость смолы; температура пропитки и отверждения; время выдержки под давлением; пониженное и избыточное давление.

Постановка проблемы. На всех этапах изготовления ТЭД: перед пропиткой якоря и катушек, после термообработки (запечки) якоря и катушек, в готовом двигателе – проверяются величина сопротивления изоляции и электрическая прочность [2, 3]. Изоляция

стержней (катушек) машин мощностью более 5 МВт и напряжением больше 6 кВ для контроля технологии изготовления подвергается дополнительному испытанию [4]: измерению тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ изоляции в зависимости от приложенного испытательного напряжения при нормальной температуре воздуха. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции производится мостом Шеринга на частоте 50 Гц. Такие испытания позволяют косвенно судить о наличии воздушных включений, обусловленных расслоением терморективной изоляции в результате ее неполной полимеризации. Измерения только на одной частоте 50 Гц не позволяют в полной мере выявить остаточную влагу и расслоение терморективной композитной изоляционной системы ТЭД. Высокая эксплуатационная надежность тяговых электрических двигателей определяется качеством изоляции обмоток, которая должна иметь высокую влагостойкость.

В последнее десятилетие значительное теоретическое и экспериментальное развитие получила **диэлектрическая спектроскопия**. В диэлектрической спектроскопии выполняется анализ функции комплексной диэлектрической проницаемости ε^* изоляции по диапазону частот и напряжения [5-7]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon - i\sigma / \omega\varepsilon_0,$$

где ε' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости (относительная диэлектрическая проницаемость ε), определяющая электрическую емкость изоляции; ε'' – мнимая часть, определяющая потери энергии в изоляции: $\varepsilon'' = \sigma / \omega\varepsilon_0$, σ – удельная объемная проводимость материала изоляции, См/м; ω – круговая частота приложенного тока, рад/с; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

© А.В. Беспрозванных, А.В. Рогинский

Тангенс угла диэлектрических потерь определяет потери на электропроводность и поляризацию

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

Частотная зависимость емкости и тангенса угла диэлектрических потерь позволяет судить о состоянии термореактивной изоляционной системы ТЭД.

Целью статьи является обоснование возможности применения диэлектрической спектроскопии для контроля состояния корпусной термореактивной композитной электроизоляционной системы асинхронных тяговых двигателей на технологической стадии изготовления.

Метод совокупных измерений диэлектрических параметров термореактивной изоляционной системы. В асинхронных тяговых двигателях (АТД), у которых фазы обмотки статора соединены в «звезду» и не имеют вывода нулевой точки (глухое соединение фаз обмотки), для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь фазной изоляции целесообразно применять двухэлектродное подключение двух фаз к измерительной цепи. Это метод совокупных измерений без закорачивания остальной, не участвующей в измерениях, фазы. Для этого необходимо выполнить *три измерения* (индексы a, b, c в (1)), по результатам которых на основании решения системы линейных алгебраических уравнений для емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь (1) определяются диэлектрические параметры изоляции обмоток каждой из фаз (индексы 1, 2, 3 в (1), соединенных в «звезду» [8]

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} &= \frac{1}{C_a} & \operatorname{tg} \delta_1 \frac{C_2}{C_1 + C_2} + \operatorname{tg} \delta_2 \frac{C_1}{C_1 + C_2} &= \operatorname{tg} \delta_a \\ \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3} &= \frac{1}{C_b} & \operatorname{tg} \delta_1 \frac{C_3}{C_1 + C_3} + \operatorname{tg} \delta_3 \frac{C_1}{C_1 + C_3} &= \operatorname{tg} \delta_b \\ \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} &= \frac{1}{C_c} & \operatorname{tg} \delta_2 \frac{C_3}{C_2 + C_3} + \operatorname{tg} \delta_3 \frac{C_2}{C_2 + C_3} &= \operatorname{tg} \delta_c \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Совокупные диэлектрические характеристики корпусной термореактивной изоляционной системы АТД. При двухэлектродном подключении одной из фаз и корпуса измеряются совокупные характеристики емкости C и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ корпусной изоляционной системы трех фаз. На рис. 1 представлена схема замещения обмоток статора АТД [9]. Обмотки соединены по схеме «звезда». Нулевая точка O недоступна для измерений. На схеме обозначены: R_1, L_1, R_2, L_2 – омические сопротивления и индуктивности обмоток каждой из фаз; C_3, R_3 – емкость каждой из фаз относительно корпуса (емкость корпусной изоляционной системы) и эквивалентное сопротивление каждой из фаз. Резистор R_3 , включенный параллельно, отражает сопротивление утечки изоляции (при измерениях на постоянном напряжении) или эквивалентное сопротивление диэлектрических потерь (при измерениях на переменном напряжении). Упрощенная двухэлементная схема замещения корпусной изоляции не отражает релаксационных процессов в изоляции, связанных с накоплением объемных зарядов.

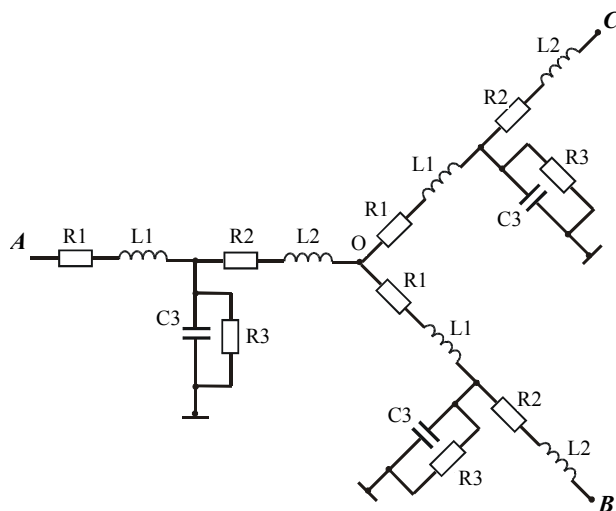


Рис. 1. Схема замещения обмоток статора АТД

Комплексное сопротивление фазы А определяется как

$$\underline{Z}_A = R_1 + j\omega L_1 + \left[\frac{R_3(-j\frac{1}{\omega C_3})}{R_3 - j\frac{1}{\omega C_3}} \right] \parallel \left[R_2 + j\omega L_2 + \frac{R_1}{2} + \frac{j\omega L_1}{2} + \frac{R_3(-j\frac{1}{\omega C_3})}{R_3 - j\frac{1}{\omega C_3}} \right] \quad (2)$$

где знаком \parallel обозначено параллельное соединение фрагментов схемы замещения.

Принимая одинаковыми омические сопротивления и индуктивности половин обмоток каждой из фаз $R_1 = R_2 = R_L, L_1 = L_2 = L$, можно определить комплексное сопротивление \underline{Z}_L и проводимость \underline{Y}_C половины обмотки

$$\underline{Z}_L = \frac{1}{2} \left(\frac{R_L}{2} + \frac{j\omega L}{2} \right), \underline{Z}_C = r - \frac{j}{\omega \cdot C}, \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}$$

Комплексное сопротивление \underline{Z}_{LC} (комплексная проводимость \underline{Y}_{LC}) второй половины обмотки и двух половин двух других обмоток

$$\underline{Z}_{LC} = \underline{Z}_L + \frac{\underline{Z}_L + \underline{Z}_C}{2}, \underline{Y}_{LC} = \frac{1}{\underline{Z}_{LC}}, \underline{Z} = \underline{Z}_L + \underline{Z}_{CLC}$$

$$\underline{Y}_{CLC} = \underline{Y}_C + \underline{Y}_{LC}, \underline{Z}_{CLC} = \frac{1}{\underline{Y}_{CLC}}, \underline{Z} = \underline{Z}_L + \underline{Z}_{CLC}$$

Тогда искомые совокупные диэлектрические характеристики изоляционной системы обмоток относительно корпуса определяются на основании (3)

$$R_e = \operatorname{real}(\underline{Z}), C_e = -\frac{\omega}{\operatorname{imag}(\underline{Z})}, \operatorname{tg} \delta_e = R_e \cdot C_e \cdot \omega \quad (3)$$

Модельные частотные зависимости совокупных диэлектрических характеристик корпусной изоляционной системы. На рис. 2, 3 приведены частотные зависимости емкости и тангенса угла диэлектрических потерь корпусной изоляционной системы обмоток АТД, построенные на основании (2, 3). В диапазоне частот от 1 до 10 кГц обмотки имеют две

резонансных частоты. Первая – в области 4.2 кГц; вторая – вблизи частоты 10 кГц. Измерения вблизи частоты 10 кГц весьма чувствительны к уровню диэлектрических потерь в изоляции (рис. 3). При изменении $\text{tg}\delta$ собственно *изоляции* от $0.074 = 7.4\%$ до $0.012 = 1.2\%$ (т.е. почти в 6 раз – см. рис. 4, частота 10 кГц) результат измерения параметра $\text{tg}\delta_{10\text{кГц}}$ всей обмотки изменяется в десятки – сотни раз (рис. 3). На рис. 3 кривые 1-3 построены в предположении: кривая 1 – при постоянном значении $\text{tg}\delta$ терморективной композитной изоляции; 2 и 3 – при степенном законе изменения тангенса угла диэлектрических потерь изоляции: 2 – при $\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_0(f_0/f)^{0.2}$; 3 – при $\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_0(f_0/f)^{0.4}$, где индексы «0» соответствуют значению на частоте 100 Гц.

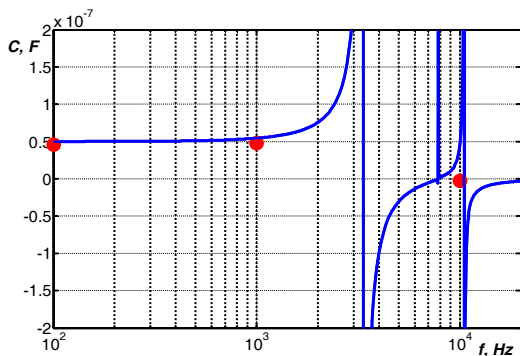


Рис. 2. Зависимость от частоты эффективной емкости обмоток относительно корпуса (емкость корпусной изоляционной системы): точки – экспериментальные данные; сплошная линия – расчет по схеме замещения рис. 1

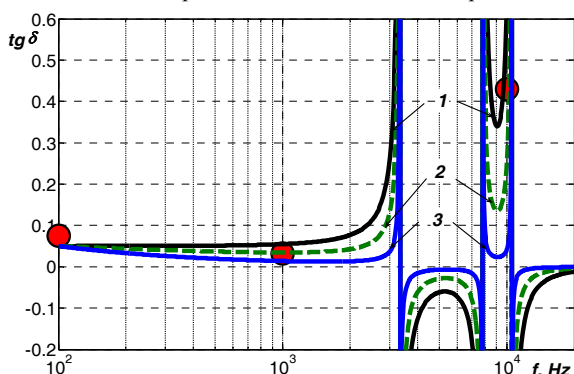


Рис. 3. Зависимости от частоты тангенса угла диэлектрических потерь корпусной изоляционной системы: точки – экспериментальные данные; сплошные линии – расчет по схеме замещения рис. 1

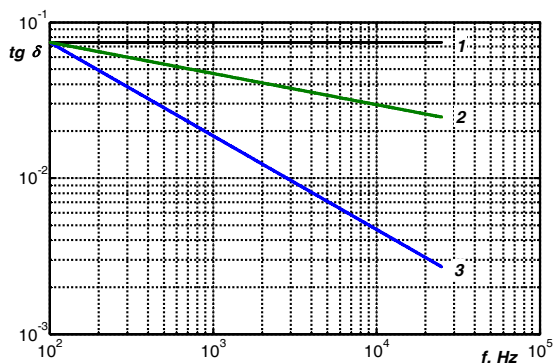


Рис. 4. Зависимости от частоты тангенса угла диэлектрических потерь корпусной терморективной изоляции, принятые при расчете частотных зависимостей C и $\text{tg}\delta$ изоляционной системы обмоток

В табл. 1 приведены результаты измерений совокупных диэлектрических характеристик корпусной изоляционной системы обмоток АД. Измерения выполнены на трех частотах: 100 Гц, 1 кГц и 10 кГц. Первые две частоты оказались ниже, а третья – выше собственной резонансной частоты (табл. 1). Значит, собственная резонансная частота обмоток (первая резонансная частота) находится в диапазоне 1-10 кГц. При измерениях на частотах, выше резонансной, измеряются *совокупные* параметры как основной, так и *паразитной* цепей. Так, при контроле емкости и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ корпусной изоляционной системы на частоте 10 кГц (выше резонансной) показания измерителя иммитанса становятся отрицательными: $C = -2.8639 \text{ нФ} < 0$. Это означает, что комплексное сопротивление изоляционного промежутка «три фазы – корпус» на этой частоте носит уже не емкостной, а индуктивный характер.

Таблица 1
Совокупные диэлектрические параметры корпусной системы асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель: - напряжение 1.875 кВ; - мощность 1200 кВт. Класс изоляции Н	Частоты измерений, кГц					
	0.1		1		10	
	C, нФ	$\text{tg}\delta$, %	C, нФ	$\text{tg}\delta$, %	C, нФ	$\text{tg}\delta$, %
	45.639	7.435	47.473	3.151	-2.8639	43.016

Выводы. Результаты моделирования частотных зависимостей совокупных диэлектрических характеристик на основе схемы замещения обмоток статора при соединении «звездой» асинхронного тягового двигателя свидетельствуют о наличии двух резонансных частот в диапазоне 1 и 10 кГц. На частоте 10 кГц тангенс угла диэлектрических потерь всей изоляционной системы обмоток изменяется в десятки – сотни раз, что дает возможность контролировать состояние композитной изоляции на этой частоте. Наличие остаточной влаги в корпусной изоляции приводит к росту $\text{tg}\delta$ корпусной композитной терморективной системы с уменьшением частоты.

Диэлектрическая спектроскопия совокупных диэлектрических характеристик на переменном напряжении позволяет оценить состояние корпусной терморективной электроизоляционной системы на конечной стадии изготовления асинхронных тяговых двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яцько С.И., Карпенко В.В., Василенко Д.Ю. Исследования устойчивости систем изоляции тяговых электрических машин к воздействию климатических факторов // Вісник Кременчужького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – №4/2010(63). – Ч.1. – С. 134-140.
2. 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.
3. IEC 60034-18-1:2010. Rotating electrical machines – Part 18-1: Functional evaluation of insulation systems – General guidelines, 2010. 33 p.

4. IEC 60060-1:2010 High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements, 2010. 149 p.
5. Gavrilina D.E. Dielectric Spectroscopy, a Modern Method for Microstructural Characterization of Materials // *Journal of Materials Science and Engineering*. – 2014. – A4, №1. – pp. 18-26.
6. Koch F. Transforming dielectric response measurements from time to frequency domain // *Nordic Insulation Symposium on Materials, Components and Diagnostics (NordIS)*. Session 4, June 15-17, 2009. Gothenburg, Sweden.
7. 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.
8. 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.
9. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. – 108 с.

REFERENCES

1. 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. *Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University*, 2010, iss.4/2010(63), part 1, pp. 134-140. (Rus).
2. 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.
3. IEC 60034-18-1:2010. Rotating electrical machines – Part 18-1: Functional evaluation of insulation systems – General guidelines. 2010. 33 p.
4. IEC 60060-1:2010 High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements. 2010. 149 p.
5. Gavrilina D.E. Dielectric Spectroscopy, a Modern Method for Microstructural Characterization of Materials. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2014, A4, no.1, pp. 18-26.
6. Koch F. Transforming dielectric response measurements from time to frequency domain. *Nordic Insulation Symposium on Materials, Components and Diagnostics (NordIS)*. Session 4, June 15-17, 2009. Gothenburg, Sweden.
7. Bezprozvannykh G.V., Kessaev A.G., Shcherba M.A. Frequency dependence of dielectric loss tangent on the degree of humidification of polyethylene cable insulation. *Technical Electrodynamics*, 2016, no.3, pp. 18-24. (Rus).
8. 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. *Electricity*, 2011, no.5, pp. 27-36. (Rus).

9. Bezprozvannykh G.V., Naboka B.G. *Matematicheskie modeli i metody rascheta elektroizoliatsionnykh konstruksii* [Mathematical models and methods of calculation of electrical designs]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2012. 108 p. (Rus).

Поступила (received) 16.12.2017

Беспрозванных Анна Викторовна¹, д.т.н., проф.,
Рогинский Александр Владимирович², аспирант,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +380 57 7076010,
e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

²Государственное предприятие «Завод «Электротряжмаш»,
61089, Харьков, Московский проспект, 299б,
тел/phone +380 50 5158552 49,
e-mail: roginский.av@gmail.com

G.V. Bezprozvannykh¹, A.V. Roginsky²

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²SE Plant Electrotiyazhmash,
299, Moskovsky Ave., Kharkiv, 61089, Ukraine.

Dielectric spectroscopy of casing thermosetting composite insulation system of induction traction electric machines.

Introduction. Thermosetting composite electric insulation of traction electric motors undergoes significant heating, moisture, overvoltage, vibration. **Purpose.** The substantiation of the possibility of using dielectric spectroscopy for monitoring the state of the hull thermosetting composite electric insulating system of induction traction motors (ITM) at the technological stage of manufacturing. **Methodology.** In the induction traction motors in which the phases of the stator winding are connected to a «star» and do not have a zero point output, in the case of a two-electrode connection of one of the phases and the housing, the combined characteristics of the capacitance and the dielectric loss tangent of the three-phase hull insulation system are measured. **Practical value.** It is established that at the second resonant frequency near 10 kHz, the tangent of the dielectric loss is the most sensitive to the state of the composite ITM insulation. Dielectric spectroscopy at alternating voltage of the combined dielectric characteristics makes it possible to evaluate the state of the hull thermosetting electrical insulating system at the final stage of manufacturing of induction traction motors. References 9, tables 1, figures 4.

Key words: thermosetting composite insulation, induction traction motor, dielectric spectroscopy, replacement circuit, electrical capacitance, dielectric loss tangent, resonance frequency.