



РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ ЖИДКОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Г.А. Муратаева, И.А. Муратаев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-0195-3116>, esis00@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-3727-5035>, goldenesis@mail.ru

Резюме: Целью работы является исследование диэлектрических характеристик масла на растительной основе в процессе циклического температурного старения и определении параметров, необходимых для контроля состояния масла, и разработке метода диагностики электроизоляционной жидкости. Методика исследования включала измерение диэлектрической проницаемости масла и тангенса угла диэлектрических потерь для образца масла, которое подвергалось циклическому температурному окислению. Тепловое окисление заключалось в циклическом нагревании и естественном остывании образца в течение суток без воздействия света. Таким образом, выполнялась имитация изменения температурного режима в баке силового трансформатора при изменяющемся графике нагрузки в течение суток. Для сравнения измерялась диэлектрическая проницаемость базового подсолнечного масла, которое хранилось в стеклянной таре при комнатной температуре без воздействия света. Результаты исследования показали, что диэлектрическая проницаемость масла на растительной основе линейно увеличивается в процессе окисления. Увеличение диэлектрической проницаемости связано с ростом числа полярных молекул в результате образования вторичных продуктов окисления. Температурное воздействие приводит к химическому изменению состава масла. В результате образуются первичные продукты окисления – гидроперекиси. Гидроперекиси при высокой температуре нестабильны и быстро разрушаются с образованием вторичных продуктов окисления. Продукты окисления масла на растительной основе не образуют осадка. Вместо этого масло начинает густеть и полимеризуется. Разработанный метод диагностики состояния электроизоляционной жидкости заключается в определении коэффициента, пропорционального скорости роста числа полярных молекул, образующихся при окислении масла. Полученные результаты показывают, что контроль только тангенса угла диэлектрических потерь не дает полной картины состояния масла на растительной основе и не всегда является индикатором окислительных процессов в масле. Процесс термического окисления оказывает устойчивое влияние на величину диэлектрической проницаемости, которая указывает на изменения в молекулярном составе масла, в результате полимеризации.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, температурное окисление, масло на растительной основе, метод диагностики.

Для цитирования: Муратаева Г.А., Муратаев И.А. Разработка метода диагностики электроизоляционной жидкости трансформаторного электрооборудования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. №4. С.41-47. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-41-47.

DEVELOPMENT OF DIAGNOSTICS METHOD OF ELECTRICAL-INSULATING LIQUID OF TRANSFORMER EQUIPMENT

GA. Murataeva, IA. Murataev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0195-3116>, esis00@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-3727-5035>, goldenesis@mail.ru

Abstract: The work is to research the dielectric characteristics of vegetable-based oil during cyclic temperature aging and to determine the parameters necessary for monitoring the state of the oil, and to develop a method for diagnosing an insulating liquid. The research technique included measuring the dielectric constant of the oil and the tangent of dielectric loss for oil that underwent cyclic temperature oxidation. Thermal oxidation consisted in cyclic heating and natural cooling of the sample during the day without exposure to light. This was done to simulate changes of the temperature in the tank of the power transformer with a changing load schedule during the day. For comparison, the dielectric constant of the base sunflower oil was measured, which was stored in a glass container at room temperature without exposure to light. The results showed that the dielectric constant of vegetable-based oil increases linearly in the oxidation process. The increase in permittivity is associated with an increase in the number of polar molecules as a result of the formation of secondary oxidation products. Under the influence of temperature, the chemical composition of the oil changes and the primary oxidation products — hydroperoxides — are formed. Vegetable-based oil oxidation products do not form a precipitate. Instead, the oil begins to thicken and polymerize. The developed method of diagnosing of an insulating liquid is to determine a coefficient proportional to the growth rate of the number of polar molecules in oil. The results show that monitoring only the tangent of dielectric losses does not give information of the state of vegetable-based oil and is not always an indicator of oxidative processes in oil. The thermal oxidation process has a steady effect on the dielectric constant, which indicates changes of the oil as a result of polymerization.

Keywords: dielectric constant, thermal aging, natural oil, diagnostic method.

For citation: Murataeva GA, Murataev IA. Development of diagnostics method of electrical-insulating liquid of transformer equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):41-47. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-41-47.

Введение

Надежность работы электроэнергетической системы во многом зависит от безаварийной работы силового трансформаторного оборудования электрических станций и подстанций. В работе маслонаполненного трансформаторного оборудования важной составляющей является трансформаторное масло, которое выполняет функции электрической изоляции, а также охлаждения магнитопровода и обмоток трансформатора. Следовательно, диагностика состояния трансформаторного масла является важной задачей. Большая часть трансформаторных масел производится из продуктов нефтепереработки. Такие масла являются пожароопасными и вредными для экологии. В настоящее время активно решается вопрос замены нефтяных электроизоляционных масел экологически чистыми биоразлагаемыми изоляционными жидкостями на основе растительных масел [1–5]. Вопросам диагностики диэлектрических характеристик биоразлагаемых масел в процессе эксплуатации посвящено небольшое число исследований [6–10]. В этой связи актуальным является вопрос разработки метода диагностики электроизоляционной жидкости на растительной основе.

Цель работы заключается в исследовании диэлектрических характеристик масла на растительной основе в процессе циклического температурного старения, определении параметров, необходимых для контроля состояния масла, и разработке метода диагностики электроизоляционной жидкости. В исследовании использовалось подсолнечное масло высшего сорта по ГОСТ 1129-2013. Сравнивая различные виды растительных масел по содержанию ненасыщенных жирных кислот, для исследований было выбрано подсолнечное масло высшего сорта, имеющее устойчивость к окислению выше, чем других растительных масел, а также имеющее схожие диэлектрические характеристики с трансформаторными маслами. Кроме того, подсолнечное масло является биологически перерабатываемым и легко утилизируемой электроизоляционной жидкостью, обладает высокой термической устойчивостью и имеет значительно более высокую температуру горения, чем у минеральных масел.

Методика исследования

Метод диагностики диэлектрических характеристик изоляции трансформаторного масла основан на принципе измерения составляющей вектора тока, находящегося в фазе с управляющим напряжением (рис. 1).

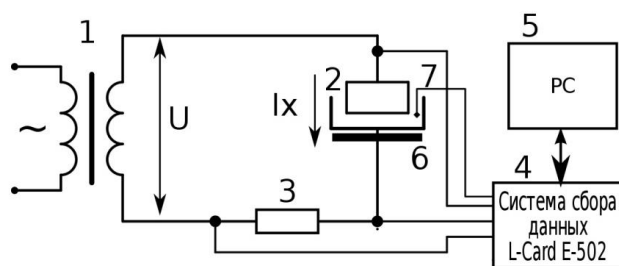


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки: 1 – испытательный трансформатор; 2 – стандартная измерительная ячейка (ГОСТ 6581-75); 3 – шунт измерительный; 4 – система сбора данных L-Card E-502; 5 – персональный компьютер; 6 – нагреватель; 7 – датчик температуры

Измеряемые значения тока и напряжения с помощью системы сбора данных *L-Card E-502* передаются в персональный компьютер, где выполняется обработка по принципу синхронного выпрямления. Если ток находится в фазе с напряжением на измерительной ячейке U , то среднее значение тока I_x будет пропорционально активной составляющей тока через измерительную ячейку с диагностируемым маслом:

$$I_a = I_x \cdot \cos \varphi,$$

где I_x – ток через измерительную ячейку.

При сдвиге фазы тока на 90° относительно напряжения на измерительной ячейке ток будет соответствовать реактивной составляющей:

$$I_r = I_x \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = I_x \cdot \sin \varphi.$$

При измерении реактивной составляющей тока получаемые значения будут пропорциональны емкости измерительной ячейки с диагностируемым образцом масла.

Диэлектрическая проницаемость электроизоляционной жидкости определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{I_r}{I_{r0}},$$

где I_{r0} – реактивная составляющая тока через пустую ячейку; A , I_r – реактивная составляющая тока через ячейку с исследуемым образцом масла, A .

Отношение этих величин позволяет определить тангенс угла диэлектрических потерь исследуемого масла [11]:

$$\frac{I_a}{I_r} = \operatorname{tg} \varphi.$$

Диэлектрическая проницаемость масла и тангенс угла диэлектрических потерь измерялись для образца масла, которое подвергалось циклическому температурному окислению. Суммарное время эксперимента составило 360 часов. Технология теплового окисления заключалась в циклическом нагревании до 120°C и естественном остывании образца до 25°C в течение 24 часов без воздействия света. Таким образом, выполнялась имитация изменения температурного режима в баке силового трансформатора при изменяющемся графике нагрузки в течение суток. Так же измерялась диэлектрическая проницаемость базового подсолнечного масла, которое хранилось в стеклянной таре при температуре 25°C без воздействия света. Измерения диэлектрических характеристик проводились на частоте питающего напряжения 50 Гц и температуре масла 25°C [12, 13].

Основные результаты и обсуждение

График изменения диэлектрической проницаемости масла на растительной основе в процессе циклического температурного окисления в течение 360 часов показан на рис. 2. Для сравнения на рис. 2 приведен график изменения диэлектрической проницаемости базового масла, которое не подвергалось температурному воздействию. Из полученных данных следует, что диэлектрическая проницаемость масла на растительной основе линейно увеличивается в процессе окисления. Увеличение диэлектрической проницаемости связано с ростом числа полярных молекул в результате образования вторичных продуктов окисления.

Температурное воздействие приводит к химическому изменению состава масла на растительной основе в процессе окисления. В результате образуются первичные продукты окисления – гидроперекиси. Гидроперекиси при высокой температуре нестабильны и быстро разрушаются с образованием вторичных продуктов окисления. К вторичным

продуктам окисления относятся альдегиды, кетоны, спирты, короткоцепочечные углеводороды и нелетучие полярные соединения [14, 15].

Продукты окисления масла на растительной основе не образуют осадка. Вместо этого масло начинает густеть и, в конечном счете, полимеризуется. В процессе термической полимеризации постепенно образовывается трехмерная структура, что приводит к желатинизации масла. Полимеризация масла в процессе работы приводит к повреждению оборудования, так как увеличивается вязкость масла, что ухудшает процесс охлаждения вплоть до полного прекращения циркуляции масла.

В качестве примера на рис. 2 показан график изменения тангенса угла диэлектрических потерь масла на растительной основе, подверженного температурному воздействию. Тангенс угла диэлектрических потерь в процессе окисления изменяется незначительно, что связано с одновременным увеличением диэлектрической проницаемости и удельной проводимости масла. Величина удельной проводимости масла на растительной основе связана с переносом заряда ионами, возникающими при диссоциации молекул примесей и продуктов окисления. В процессе окисления растет полярность масла, что увеличивает степень диссоциации молекул. Удельная проводимость окисленного масла на растительной основе при этом увеличивается. Таким образом, однозначно выявить процесс старения электроизоляционной жидкости на растительной основе по значениям тангенса угла диэлектрических потерь затруднительно.

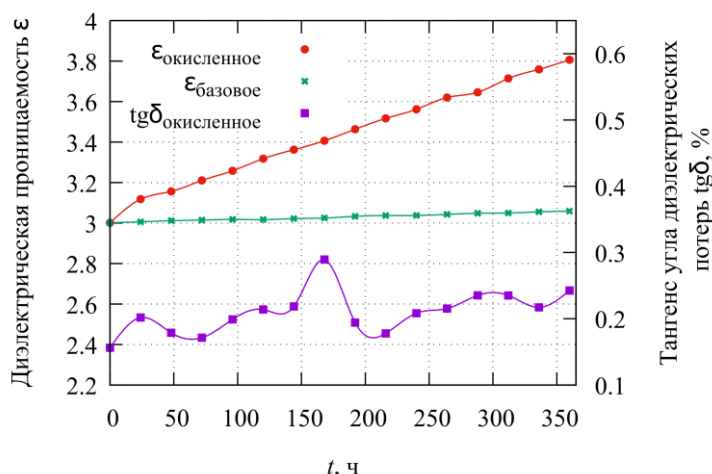


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости образца при температуре 25°C от длительности циклического температурного окисления

Разработанный метод диагностики состояния электроизоляционной жидкости заключается в определении коэффициента K_v , пропорционального скорости роста числа полярных молекул, образующихся при окислении масла. Измеряя диэлектрическую проницаемость масла каждые 24 часа, рассчитывается диагностический коэффициент K_v по формуле

$$K_v = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{i-1}},$$

где ϵ_i – предыдущее значение диэлектрической проницаемости; ϵ_{i-1} – текущее значение диэлектрической проницаемости.

Изменение коэффициента для окисляемого и базового масла показано на рис 3. На графике видны два события резкого изменения коэффициента K_v . Первое изменение (0–70 часов) вызвано появлением в масле продуктов разрушения гидроперекисей вследствие воздействия высокой температуры, что привело к образованию большого числа полярных молекул, которые вызвали увеличение диэлектрической проницаемости масла. При этом продукты окисления привели к увеличению вязкости масла, подвергнутого температурному воздействию. Значение кинематической вязкости масла перед температурным окислением было равно 49,78 мм²/с, через 70 часов оно составило 99,27 мм²/с. Второе изменение (250–350 часов) связано с формированием трехмерной структуры и желатинизацией масла. При этом в исследуемом масле сформировались липкие студнеобразные частицы, число которых со временем увеличивалось. Вязкость масла, не перешедшего в состояние желатинизации, была равна 125,56 мм²/с.

Из полученных данных следует, что, выполняя постоянный контроль значения диэлектрической проницаемости масла и определяя коэффициент K_v , можно диагностировать изменение состояния диэлектрической жидкости, вызванное окислительными процессами, и выявлять начало процесса полимеризации.

Проведенные исследования показали, что при естественном старении масла на растительной основе изменение коэффициента K_v за 24 часа не превышает 0,5 %. Увеличение коэффициента K_v более чем на 1 % является признаком химического изменения масла и началом процесса его полимеризации.

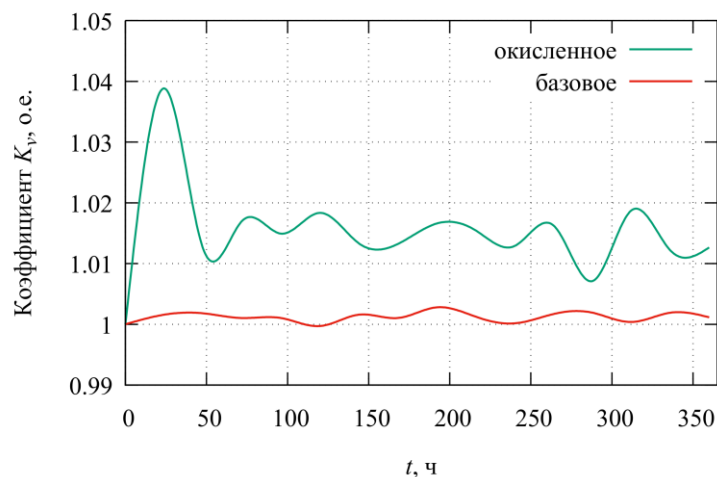


Рис. 3. Изменение диагностического параметра K_v при циклическом тепловом окислении масла

Выводы

Полученные результаты показывают, что контроль только тангенса угла диэлектрических потерь не дает полной картины состояния масла на растительной основе и не всегда может являться индикатором окислительных процессов исследуемого масла.

Процесс термического окисления приводит к росту величины диэлектрической проницаемости масла, которая указывает на изменения в молекулярном составе масла, вызванные полимеризацией.

Разработанный метод диагностики позволяет оперативно контролировать процессы окисления и полимеризации электроизоляционной жидкости на растительной основе.

Литература

1. Oommen T.V. Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2002. V. 18, N. 1. pp. 7-11.
2. Semančík P., Cimbala R., Kolcunová I.: Dielectric Analysis of Natural Oils. Acta of Electrotechnica et Informatica. September 2007. V.7. N 3.
3. Ocón R. Experience with the first 230 kV SHELL type autotransformer retrofilled with natural ester on Mexican grid / Proc. of 45 th CIGRE Session, Paris, 2014. Paper A2. 307.
4. K. Bandara, C. Ekanayake, T. Saha, and H. Ma, "Performance of Natural Ester as a Transformer Oil in Moisture-Rich Environments," Energies. 2016. V. N. 4. P. 258,
5. Rafiq, M., Y. Lv, Y. Zhou, K. Ma, W. Wang, C. Li, and Q. Wang, Use of vegetable oils as transformer oils a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. №52. pp.308-324.
6. Hajek J. Considerations for the Design, Manufacture, and Retro- filling of Power Transformers with High Fire Point, Biodegradable Ester Fluids / Proc. of 44 th CIGRE Session, Paris, 2012. Paper A2. 203.
7. Spohner, M. Study of the dielectric properties of vegetable oils and their constituents. in 2016 Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE). 2016.
8. Taslak, E., C. Kocatepe, O. Arıkan, and C. Kumru, Electrical Analysis of Corn Oil as an Alternative to Mineral Oil in Power Transformers. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2015. V.9. N.8. pp. 873-877.
9. IEC 62770 (2013): Fluids for electrotechnical applications - Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment. Edition 1.0. Geneva, IEC Central Office. 2013.P.38
10. Dilip K, Amarjit S, Paramjit ST (2013). Interrelationship between viscosity and electrical properties for edible oils. J. Food Sci. Technol.

11. Patsch, R. Dielectric Diagnostics of Power Transformers and Cables - Return Voltage Measurements, Theory and Practical Results. VDE High Voltage Technology 2018; ETG-Symposium.
12. Muratayev I.A., Muratayeva G.A. Influence of the oxygen aging on dielectric characteristics of oils on the vegetable basis // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. V. 8. pp. 2557-2560.
13. Муратаева Г.А., Муратаев И.А. Математическая модель диэлектрических характеристик масла на растительной основе / Известия Тульского государственного университета. Технические науки: Тула. Изд-во: ТулГУ, 2017. № 9-1. С. 524-531.
14. Ладыгин В.В. Конструирование оксистабильных композиций растительных масел: дис. ... канд. техн. наук. Спб., 2015.
15. Аниеева М.А. Исследование стабильности против окисления рапсового масла как диэлектрической жидкости для высоковольтного оборудования // Журнал Инженерной теплофизики. 2016. Т. 25(2). С. 236–239.

Авторы публикации

Муратаева Галия Амировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Муратаев Ибрагим Амирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Oommen TV. Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2002;18(1):7-11.
2. Semančík P., Cimbala R., Kolcunová I.: Dielectric Analysis of Natural Oils. Acta of Electrotechnica et Informatica. September 2007.
3. Ocón R. Experience with the first 230 kV SHELL type autotransformer retrofilled with natural ester on Mexican grid / R. Ocón, R. Montes / Proc. of 45 th CIGRE Session, Paris, 2014. Paper A2. 307.
4. Bandara K., Ekanayake C., Saha T, and Ma H., "Performance of Natural Ester as a Transformer Oil in Moisture-Rich Environments". *Energies* 2016;9(4):258.
5. Rafiq, M., Lv Y., Zhou Y., et al. Use of vegetable oils as transformer oils a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;52:308-324.
6. Hajek J. Considerations for the Design, Manufacture, and Retro – filling of Power Transformers with High Fire Point, Biodegradable Ester Fluids. Proc. of 44 th CIGRE Session, Paris, 2012. Paper A2. 203.
7. Spohner, M. Study of the dielectric properties of vegetable oils and their constituents. in *2016 Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE)*. 2016.
8. Taslak, E., Kocatepe C., Arıkan O., and C. Kumru, Electrical Analysis of Corn Oil as an Alternative to Mineral Oil in Power Transformers. World Academy of Science, Engineering and Technology, International. *Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2015; 9(8):873-877.
9. IEC 62770 (2013): *Fluids for electrotechnical applications - Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment*. Edition 1.0. Geneva, IEC Central Office. 2013. P. 38.
10. Dilip K, Amarjit S, Paramjit ST (2013). *Interrelationship between viscosity and electrical properties for edible oils*. J. Food Sci. Technol.
11. Patsch, R. Dielectric Diagnostics of Power Transformers and Cables - Return Voltage Measurements. Theory and Practical Results. VDE . *High Voltage Technology* 2018. ETG-Symposium.
12. Muratayev IA., Muratayeva GA. Influence of the oxygen aging on dielectric characteristics of oils on the vegetable basis. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016;8: 2557-2560.
13. Муратаева Г.А., Муратаев И.А. Математическая модель диэлектрических характеристик масла на растительной основе. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki: Tula: Izd-vo TulGU*, 2017;9-1:524-531.
14. Ladygin VV. *Konstruirovaniye oksistabil'nykh kompozitsiy rastitel'nykh masel*: dis. ... kand. tekhn. nauk. Spb., 2015.
15. Anikeeva MA. Issledovanie stabil'nosti protiv okisleniya rapsovogo masla kak dielektricheskoy zhidkosti dlya vysokovol'tnogo oborudovaniya . *Zhurnal. inzhenernoy teplofiziki*. 2016;25(2):236–239.

Authors of the publication

Galiya A. Murataeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

© Г.А. Муратаева, И.А. Муратаев

Ibragim A. Murataev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

21 мая 2019 г.